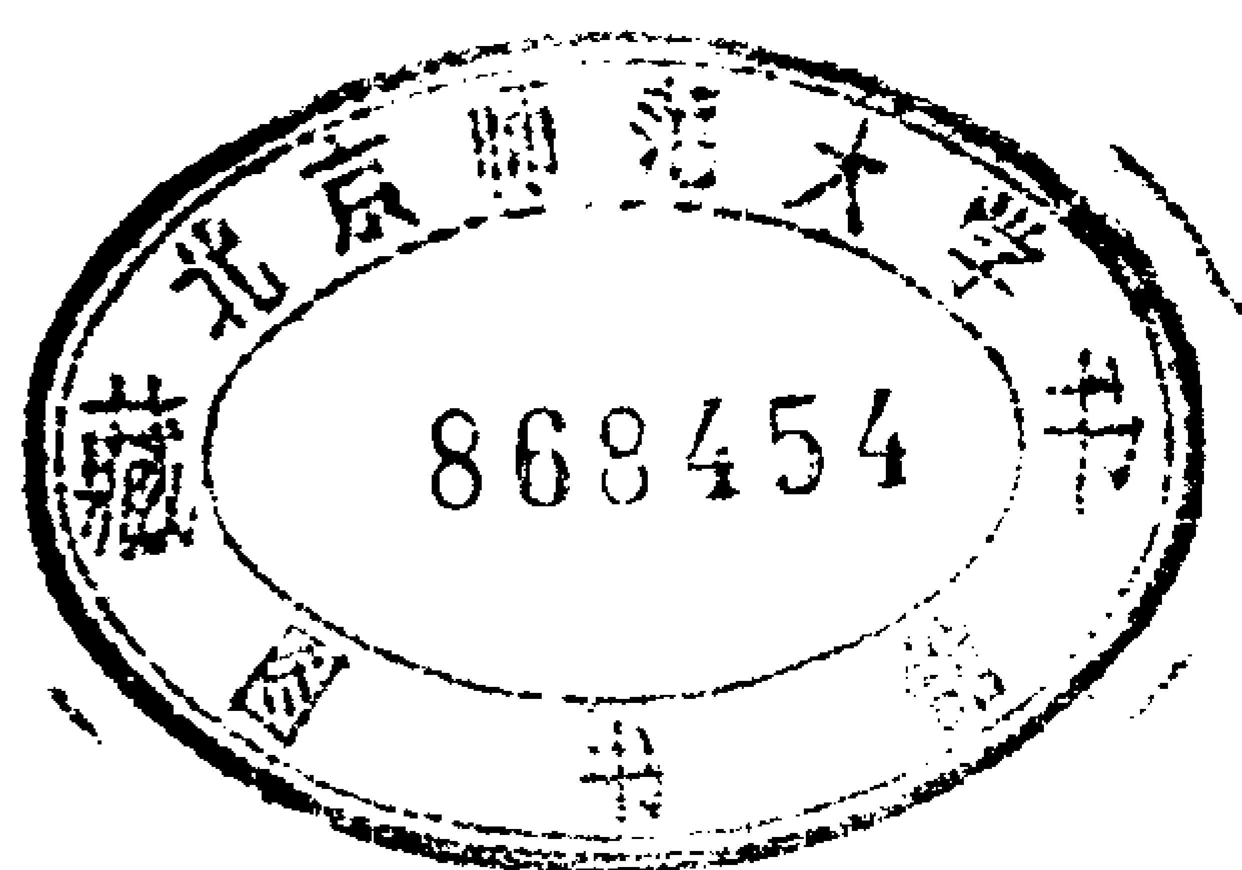
物理学发展史

〔美〕乔治·伽莫夫著

高士圻译　侯德彭校



商　务　印　书　馆

1981年·北京

George Gamow

BIOGRAHY OF PHYSICS

Hutchinson Science Library

London

物理学发展史

〔美〕乔治·伽莫夫著

高士圻译　侯德彭校

商　务　印　书　馆　出　版

（北京王府井大街36号）

新华书店北京发行所发行

一二〇二工厂印刷

统一书号：2017·251

1981年7月第1版　　开本 850×1168 1/32

1981年7月北京第1次印刷　　字数 238 千

印数 1—9,000 册　　印张 $10^1/_2$

定价：1.30 元

译者前言

本书的作者乔治·伽莫夫，美籍俄人，1904年出生于敖德萨，列宁格勒大学毕业。他曾在乔治·华盛顿大学任教多年，从1956年起担任博尔德的科罗拉多大学物理学教授。1968年去世。

伽莫夫主要从事天文学的研究，并在物理学、生物学等方面也做过一些贡献。例如，他曾在1948年提出过一种理论，认为中微子比电子小20—800倍，当它速度极大时就发出一种力波，这种力波就是重力的来源。目前得到公认的遗传密码概念，也是他最先提出来的。除此之外，伽莫夫还是一位杰出的科普作家，他的著作很多。他经常为《科学月刊》、《现代物理》、《美国科学家》、《科学的美国人》等杂志撰稿，并写了很多深受国内外广大读者欢迎的科普读物:《太阳的生与死》、《地球小史》、《从一到无穷大》、《宇宙的创始》、《月球》、《物质、地球和天空》等等。由于他在写作科普读物方面的卓越贡献，曾在1956年获得联合国教科文组织颁发的卡林格科普奖金。

《物理学发展史》出版于1962年，是一本既介绍物理学发展史，也涉及物理学主要内容的普及读物。作者的文笔流畅生动，饶有风趣，书中穿插了很多科学家的轶事，并由作者本人做了许多有趣的插图。这样，一些枯燥难懂的物理学定律在他的笔下变成了生动活泼的故事，物理学发展的过程和史实也与物理学内容的本身结成了有机的整体。对于缺乏物理学知识的读者，他们可以从本书中学到一些基本的物理概念，并激发起进一步学习的兴趣。

对于学过物理学课程的高中和大专学校学生，也能够从本书中了解物理学的发展过程，从而使学过的知识进一步深化，融会贯通。

应当指出，作者在本书中提出的论点，有些是有争议的。例如，他认为目前已知的质子、中子、电子等“基本粒子”是一些不能再分的真正的基本粒子，认为它们就是物质的终极结构。但是，近二十年来的大量的实验结果和理论都支持与此相反的观点，人们相继提出坂田模型、夸克模型、层子模型等理论，都认为“基本粒子”是有内部结构的，“基本粒子”并不基本。就在十几年前，高能物理工作者中能接受这种“基本粒子也有内部结构”思想的人还只占少数，而现在这种看法已被大多数高能物理工作者所接受，并在寻找“夸克”和“层子”的实验中取得了重要的进展。当然，探索“基本粒子”的内部结构并非易事，物理学家至今仍然未能用实验方法把“基本粒子”轰开，理论方面的状况也远远不能令人满意。但是，随着物理学的进一步发展，我们相信目前的“基本粒子”并非物质的终极结构这一理论一定会取得最后胜利。读者在阅读的时候，对书中这部分内容要注意分析，不要把它们全当成物理学的定论来接受。

由于译者的水平不高，加之时间仓促，译文中容有讹错，恳切地希望读者批评指正。译文承侯德彭同志校订，特此致谢。

译　者

1979年春节于天津

目　　录

胡

原　序

物理学方面的书有两种。一种是教科书，目的是要教给读者种种物理事实和理论。这种书往往略去科学发展的整个历史面貌，有关古往今来的伟大科学家的唯一资料，仅限于在他们的名字后面划上一个括号，标明其生卒年代（如仍在世，就以“——”表示）。另一种书基本上是历史书，专写传记性材料和科学大师的个性分析，而仅简单地列出他们的各种发现，认为读者在研究某门科学的历史时，对这门科学本身已经谙熟了。

本书试图采取的是一种折衷的办法，即在公正的基础上讨论伽利略的受审和他所发现的基本力学定律，或在详细讨论玻尔的原子模型的同时，谈谈我个人对他的一些回忆。全书共有八章，每一章的讨论都以一两个伟大人物为中心，旁及当时其他的物理学家和他们对物理学的贡献。所以我略去了许多科学家的名字，而在大多数物理学史的书籍中，这些名字是会找到的。同样的，我也略去了正规的物理教科书中“必然具备”的许多课题。这本书的目的，是要读者弄清楚什么是物理学，物理学家是一些什么样的人，从而激起读者充分的兴趣，去寻找写得更系统的有关这门学科的书籍来学习。

人们在读到有关古今伟大人物的文章时，总是希望知道他们长的是个什么样子。但是鉴于本书插页的篇幅有限，我决定把它们全部用于复制各种物理现象的真实照片，诸如光谱结构、电子衍射和原子核粒子在云室中的径迹等等的照片。因此只好把物理学

家的肖像改成了十张速写画。我不是艺术家，不得不采用一些辅助的办法，例如把照像底片投影在纸上画出，结果还算相当逼真，因而值得把它们印在书中。

我希望这本书会激起青年读者（或许也有一些年纪较大的读者）学习物理学的兴趣，这是本书的主要目的。

乔治·伽莫夫
于科罗拉多大学

第一章　物理学的开端

追溯物理学的起源就象寻找许多大江长河的发源地一样十分困难。细小的溪流在热带植物绿叶下潺潺作响，或从北方荒野中苔藓覆盖的岩石下悄然溢出；山坡上哗哗淌下的水流聚成小河，小河又汇成真正的"河流"。河床越变越宽，随着支流的不断加入最后变成了汹涌澎湃的巨流——变成密西西比河或伏尔加河，尼罗河或亚马逊河——最后注入大洋之中。

使物理学大河诞生的小溪遍布在人类居住的整个地面上。但其中多数似乎是集中在巴尔干半岛南端．那里居住的人们我们今天称之为"古希腊人"，至少在我们这些继承了那些早期"知识分子"的文化的人看来是如此。值得注意的是，虽然其它的古代民族，例如巴比伦人和埃及人，对数学和天文学的早期发展做出了巨大贡献，但对物理学的发展却是毫无作为的。同希腊科学比较起来之所以有这种缺陷，一种可能的解释是：巴比伦人和埃及人的上帝都高居在九天之外，而古希腊的诸神却生活在海拔只有10,000英尺左右的奥林匹斯山之巅*，这样，要了解地球上的问题就接近得多了。传说"磁学"一词就是起源于一个牧羊人的名字 Μάγνης，他惊奇地发现，他的包着铁皮的牧杖被路旁的一块石头吸过去了（磁铁矿石）。类似地，"电学"一词是从希腊字 ἤλεκτρον 演化而来，这个字的意思是琥珀。大概是因为另一位希腊牧羊人想用羊

---

* 译注：Olympus 是希腊北部 Thessaly 和 Macedonia 交界处山脉东头的高山，相传太古时代希腊诸神就住在这座山上。

皮把琥珀擦亮，从而发现琥珀具有一种可以吸引碎木屑的神秘性质才这样起名的。

毕达格拉斯的琴弦定律

尽管这些传说很难找到什么确凿的证据，但公元前六世纪中叶的希腊哲学家毕达格拉斯的发现却是有据可查的。他确信世界是由数字主宰的，并研究了乐器上琴弦的长度之间的关系，这些琴弦能产生和谐的乐声。为此，他使用的是所谓一弦琴，即一根长度可以变化的弦，并用悬挂重物的办法使它受到不同的张力。他用同样的重物而改变弦长，发现当弦长之间有简单的数字关系时，就可得到一对对谐音。2:1 的弦长对应于大家都知道的八音度，3:2 对应第五音，4:3 对应第四音。这一发现大概是物理定律的第一次数学公式表示，完全可以认为是今天所谓理论物理学发展的第一步。用现代的物理术语来说，我们可以这样表述毕达格拉斯的发现：在给定的张力作用下，一根给定弦的频率(即每秒内振动的次数)与其长度成反比。因此，如果第二根弦（图 I-1b）的长度是第一根弦（图 I-1a）的长度的一半，它的振动频率就高一倍。如果两根弦长成 3:2 或 4:3 的比例，它们的振动频率就成 2:3 或 3:4 之比（图 I-1 c, d)。因为人脑中从耳朵接受神经信号的那一部分的

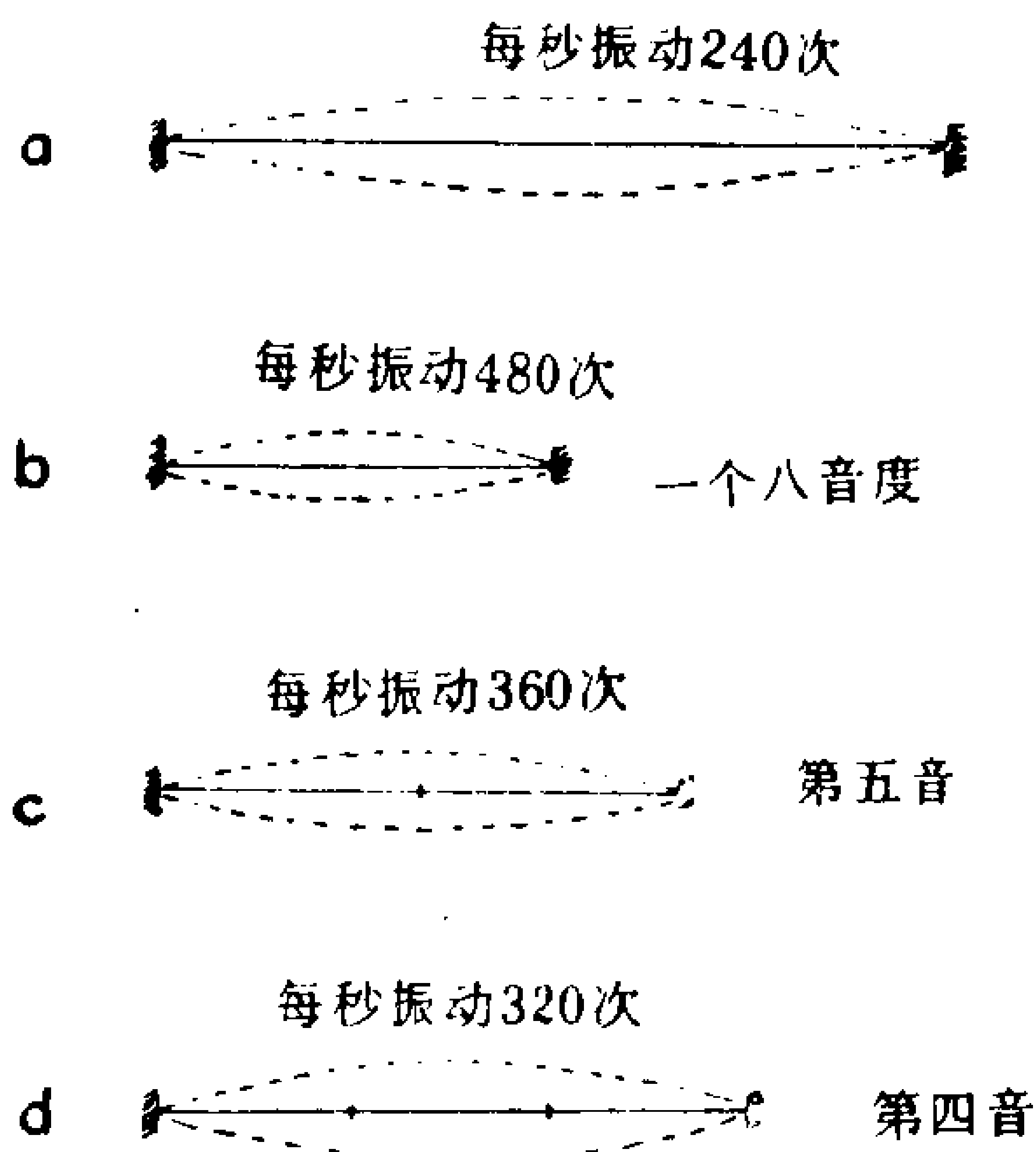


图 I-1 毕达格拉斯的琴弦定律

构造使得只有简单的频率比——例如 3:4——才是“悦耳的”，而复杂的比例——例如 137:171——则是“刺耳的”（这要等将来的大脑生理学家来解释这个事实了！），所以要得到完美的和音，弦长必须成简单的数字比关系。

毕达格拉斯试图向前更进一步，他提出：因为行星的运动“必须是和谐的”，它们到地球的距离也一定与希腊民族乐器七弦琴上产生七个基音的琴弦（在同样的张力下）的长度一样，有相同的比例关系。这个推测大概就是现在常称之为“病理物理理论”的第一个例证吧！

原子论者狄谟克瑞特

另一个重要的物理理论是由大约公元前400年的另一位古希腊哲学家狄谟克瑞特提出的。用现代术语来说，这个理论可以称之为“没有任何实验基础的理论”，但事实是，“梦话道出了真情”。狄谟克瑞特所抱的观念是认为所有的物体都由数不清的、小得人眼无法看到的粒子集合而成的。他把这些粒子称为“原子”，在希腊语中就是“不可分的”（ἄτομος）意思，因为他相信这些粒子代表着把物体分为越来越小的部分的最后阶段。他认为有四种不同的原子，即石原子，干燥而重；水原子，重而潮湿；气原子，冷而轻；火原子，易变而热。他认为这四种不同的原子结合起来，就造成了所有已知的物质。土壤是石原子与水原子的结合。在阳光照耀下从土壤中生长出来的植物是土壤中的石原子和水原子与太阳中来的火原子结合而成的。这就是为什么干燥的枯木在失去其所有的水原子时会燃烧的原因，燃烧时放出火原子（火焰），而只剩下石原子（灰烬）。当我们把某种石块（金属矿石）放入火焰时，石原子就与火原子结合在一起产生出称为金属的物质。象铁那样廉价的金

属，因为所含的火原子数量很少，所以显得有些笨重，金子含火原子最多，所以灿烂夺目而价值昂贵。当然，谁有办法给普通的铁加进更多的火原子，他就可以造出贵重的黄金了！

如果一个学生在他的初等化学考试中讲这些话，他肯定会得零分。然而，关于化学变化本性的这些特例虽然无疑是错误的，但只用少数基本的化学元素的组合来得到几乎无数种不同物质的基本思想，却是完全正确的，并且现已成为当代化学的基础。但是，从狄谟克瑞特时代到道尔顿*的时代，花了22个世纪的光阴才把事情弄清楚。

亚里斯多德的哲学

亚里斯多德是古代希腊世界的巨人之一。他的成名有两方面的原因：其一，因为他是一位真正的天才；第二，因为他曾任马其顿的亚历山大大帝的私人教师，后来又成了亚历山大大帝的门徒。他在公元前384年生于爱琴海上一个希腊的殖民城市斯塔基拉，出身于一个原先是马其顿王室宫廷医师的家庭。十七岁的时候，他去雅典加入了柏拉图的哲学学派，并一直是柏拉图的热心追随者，直到柏拉图于公元前347年去世。此后，亚里斯多德进行了广泛的周游，最后又回到了雅典，在里西姆创立了当时称为“逍遥学派”的哲学学派。流传至今的大多数亚里斯多德的著作，差不多都是他在里西姆传授各门科学时的讲稿。其中有关于他所创建的逻辑学和心理学的论文，还有关于政治学和各种生物学问题，特别是

* 译注：约翰·道尔顿是英国科学家(1766—1844)，纺织工人的儿子，因家贫十二岁就开始自谋生路。长大后与一位盲人往来，得到他的指导，学会了希腊文，拉丁文，数学及自然科学。起先研究物理，后来又研究化学，对二者均有发现与贡献，最著名的成就就是化学上的原子论。

动植物分类问题的论文。但是，尽管亚里斯多德在所有这些领域中都做出了巨大的贡献，并在死后影响了人类的思想达两千年之久，他在物理学领域中最重要的贡献也许却只是创造了这门学科的名字，这是他从希腊字 φύσις（意为自然）一词推演而来的。亚里斯多德哲学对于研究物理学现象是不足的，这是因为他的哲学思想没有象许多其他古希腊哲学家那样与数学结合起来。他关于地上物体的运动和天体运动的思想对科学进步所起的作用几乎是害大于益。到了文艺复兴时期科学思想再度活跃起来时，伽利略等人不得不为了挣脱亚里斯多德哲学的羁绊而进行艰苦的斗争，因为当时公认亚里斯多德的思想是“知识的权威性结论”，完全不必去进一步探讨事物的本质了。

阿基米德的杠杆定律

在亚里斯多德之后大约一个世纪，另一位伟大的古代希腊人是阿基米德（图 I-2）。阿基米德是力学之父，住在希腊殖民地西西里的首都锡拉丘兹。他是一位天文学家的儿子，所以很早就对数学有兴趣并且掌握了熟练的数学技巧。在他的一生中，曾对数学的各个分支作了许多很重要的

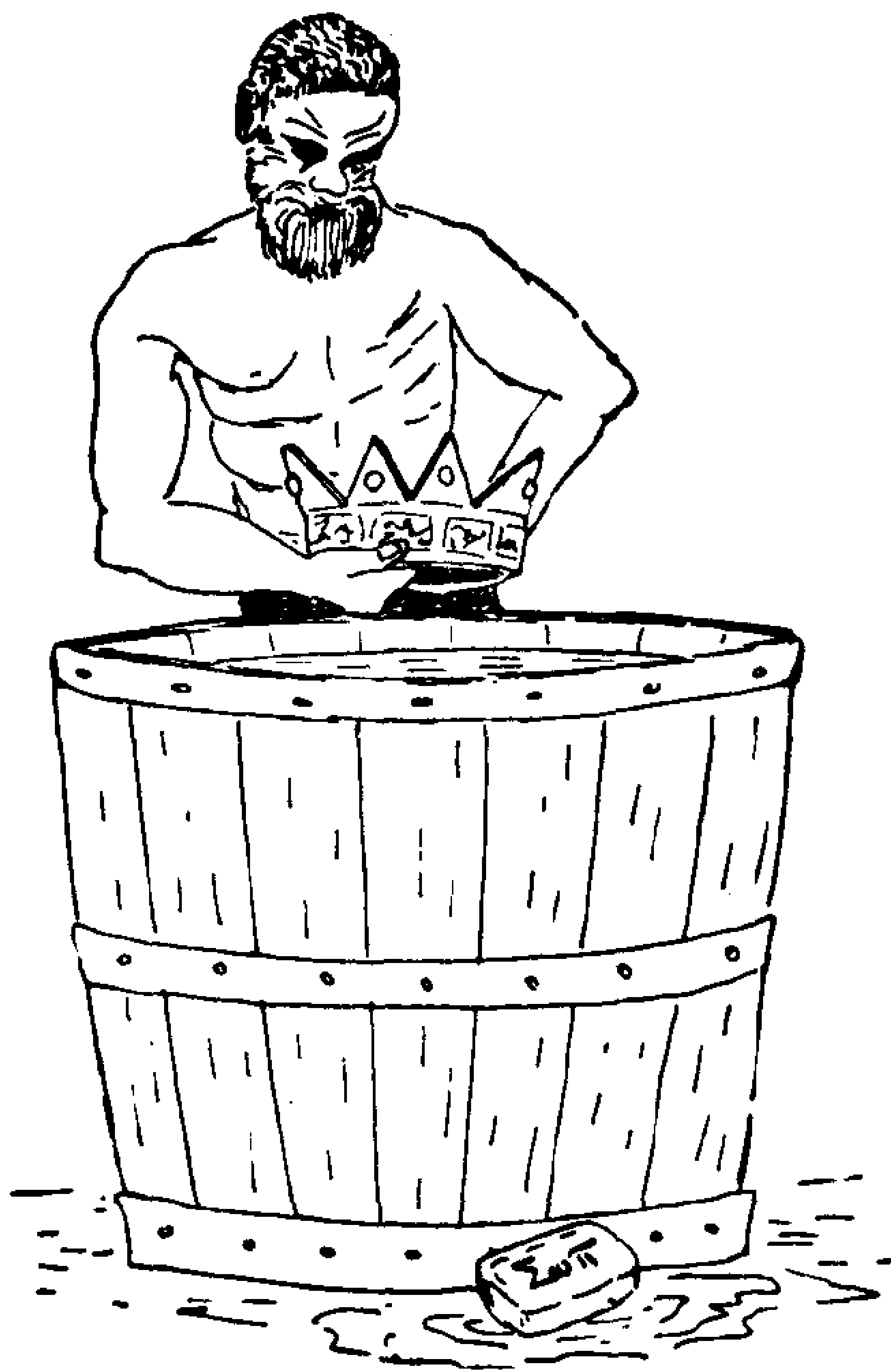


图 I-2 阿基米德与皇冠

贡献。他在纯数学方面最重要的工作，是发现了球体及其外接圆柱体的面积与体积之间的关系。事实上，按照他本人的意愿，他的墓地就是用一个球内接于圆柱体作为标志的。在他写的一本名为“数沙者”的书中，他提出了一种书写很大数字的方法，按位置不同赋于一列数中每个数字以不同的“序”，并用这种方法来解决如何写下地球那样大的一个球体中所包含的沙粒数目的问题*。

阿基米德在其名著“论平面的平衡”（两卷本）一书中提出了杠杆定律，并讨论了如何求任一给定物体的重心问题。今天的读者会感到阿基米德的著作体裁太累赘又冗长，在很多方面都与欧几里德的几何书的体裁类似。事实上，在阿基米德那个时代，希腊的数学几乎完全局限于几何学，代数是很晚以后由阿拉伯人发明的。因此，数学领域和其它物理学分支中的各种证明当时都是用几何作图来完成的，而不是象我们现在这样去解代数方程。和欧几里德几何学——许多读者在学校学习它时都曾累得满头大汗——一样，阿基米德表述“静力学”（即平衡问题）的基本定律的方法也是先提出一些“公设”，然后再从中推演出若干“定理”。在这里我们把他这本著作第一卷的开头引述如下**：

1. 相同的重物放在相同的距离上就处于平衡状态；而相同的重物放在不同的距离上则不平衡，杠杆要朝着放在较远距离上的那个重物倾斜。

2. 当放在一定距离上的重物处于平衡时，如果在其中一个重

---

* 我们现在是用十进制记数的方法，即多少个个位，多少个十，多少个百，多少个千等等。

** 本章援引阿基米德，普鲁塔奇，维特鲁维乌斯，赫伦和托勒密的文字，曾征得下述著作出版者的同意：Marris R Cohen and I. E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science*, Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press Copyright 1948 By the President and Fellows of Harvard College.

物上加一点份量，它们就不平衡了，杠杆要向加了份量的那个重物一端倾斜。

3. 同理，如果从其中一个重物取出一点份量，它们也不平衡，杠杆向没有取出份量的那个重物一边倾斜。

4. 全等的平面图形如果互相重叠地放在一起，则它们的重心也同样重合。

5. 如果图形是不相等的但是相似，则其重心也有相似的位置。所谓相似图形的有相似位置的点，我的意思是指如果过这些点分别到相等的角作直线，则它们与对应的边所成之角也是相等的。

6. 如果处在一定距离上的两个重物处于平衡，则另外两个与它们相等的重物处于同样距离时也会处于平衡（这不是显然的吗？）。

7. 任何一个图形，如果沿同一方向其周边都是下凹的，其重心必在图形之内。

从这些公设出发，靠直接的逻辑论证可以推出十五条定理。我们这里给出前五个定理，而略去它们的证明，同时引述第六条定理的严格证明，因为其中包括了基本的杠杆定律。

定理：

1. 在相同距离上处于平衡的重物是相等的……

2. 在相等距离上不等的重物不平衡，杠杆向较重的重物倾斜……

3. 不等的重物也会（或者说可以）在不同的距离上达到平衡，较重的物体应在较近的距离上……

4. 如果两个相等的重物没有共同的重心，则整体的重心是在它们重心的联线的中点上。

5. 如果三个相等重物的重心处在一条直线上，并隔开相等的距离，则整个体系的重心与中间重物的重心重合。

我们现在转向第六个定理的证明，为了方便读者，我们多少将它现代化了：

6. 两重物平衡时，所处的距离与重量成反比。

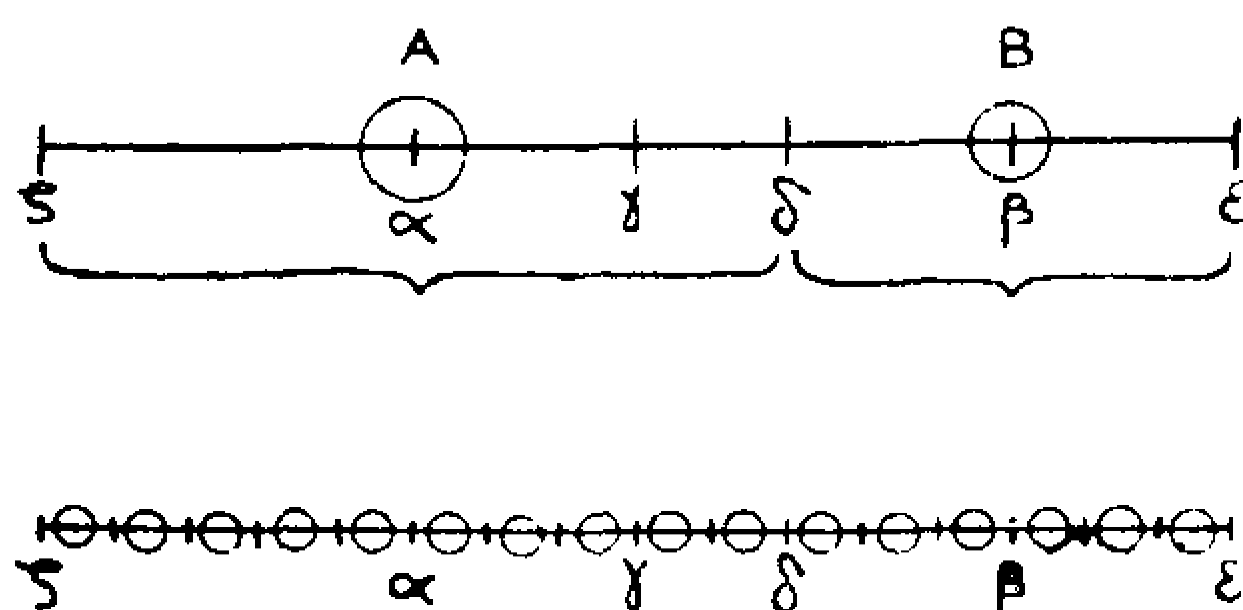


图 I-3 阿基米德对杠杆定律的证明

假定重物 A 和 B 是有公测度的*，图上的点表示它们的重心（图 I-3 a）。过 α 和 β 作一条直线，它在 γ 处被分成两段，使得

$$A:B=\overline{\beta\gamma}:\overline{\gamma\alpha}$$

我们要证明 γ 是这两个重物总体的重心。因为 A 和 B 是有公测度的，所以 $\overline{\beta\gamma}$ 和 $\overline{\gamma\alpha}$ 也有公测度。设 $\overline{\mu\nu}$ 是 $\overline{\beta\gamma}$ 和 $\overline{\gamma\alpha}$ 的公测度，并使 $\overline{\beta\delta}$ 和 $\overline{\beta\varepsilon}$ 各等于 $\overline{\alpha\gamma}$，$\overline{\alpha\varsigma}$ 等于 $\overline{\beta\gamma}$。因为 $\overline{\beta\delta}=\overline{\gamma\alpha}$，故 $\overline{\alpha\delta}=\overline{\gamma\beta}$，又 $\overline{\delta\varepsilon}$ 在 β 处被平分，$\overline{\varsigma\delta}$ 在 α 处被平分，所以 $\overline{\varsigma\delta}$ 和 $\overline{\delta\varepsilon}$ 必须分别是 $\overline{\mu\nu}$ 的偶数倍。

今取一重量 Ω，使得 A 中包含 Ω 的倍数与 $\overline{\varsigma\delta}$ 中包含 $\overline{\mu\nu}$ 的倍数同样多，于是：

$$A:\Omega=\overline{\varsigma\delta}:\overline{\mu\nu}$$

但是因为

$$B:A=\overline{\gamma\alpha}:\overline{\beta\gamma}=\overline{\delta\varepsilon}:\overline{\varsigma\delta}$$

因此

$$B:\Omega=\overline{\delta\varepsilon}:\overline{\mu\nu}$$

或者说 B 中含 Ω 的倍数与 $\overline{\delta\varepsilon}$ 中含 $\overline{\mu\nu}$ 的倍数同样多。因此 Ω 是

---

* 这就是说，这两个重量之比可以用一个有理分数如 $\frac{5}{3}$，$\frac{117}{32}$ 等等来表示。

A 和 B 公测度。

现把 $\overline{s\delta}$ 和 $\overline{\delta\varepsilon}$ 分成许多等分，每份各等于 $\overline{\mu\nu}$，把 A 和 B 也分成许多等分，每份等于 Ω。于是 A 被分成的份数将等于 $\overline{s\delta}$ 被分的份数，B 于被分成的份数等 $\overline{\delta\varepsilon}$ 分的份数。把 A 的每一份放在 $\overline{s\delta}$ 中每一份 $\overline{\mu\nu}$ 的中点，把 B 的每一份放在 $\overline{\delta\varepsilon}$ 中每一份 $\overline{\mu\nu}$ 的中点(图 I-3b)。

于是等距离地分布在 $\overline{s\delta}$ 上的 A 的诸等份的重心位于 $\overline{s\delta}$ 的中点 α 上，而等距离地分布在 $\overline{\delta\varepsilon}$ 上的 B 的诸等份的重心位于 $\overline{\delta\varepsilon}$ 的中点 β 上。但是 A 和 B 的诸等份 Ω 所组成的体系，是等距离地分布在 $\overline{s\varepsilon}$ 上的数目均匀的相同重量的体系。此外，因为 $\overline{s\alpha}=\overline{\gamma\beta}$ 和 $\overline{\alpha\gamma}=\overline{\beta\varepsilon}$，$\overline{s\gamma}=\overline{\gamma\varepsilon}$，所以 γ 是 $\overline{s\varepsilon}$ 的中点，因此 γ 是分布在 $\overline{s\varepsilon}$ 上的整个体系的重心。所以作用在 α 上的 A 和作用在 β 上的 B 对 γ 点来说处于平衡。

这个定理接下去就是第七定理，它在 A 和 B 是无公测度* 的情况下证明了同样的陈述。

杠杆原理的发现和各种应用在古代引起了一场轰动，我们可以在普鲁塔奇的“玛塞勒斯生平”一书所作的描写中看到这种情形。玛塞勒斯是第二次罗马与迦太基战争中占领了锡拉丘兹的一位罗马将军，他对杀害阿基米德要负部分责任，当时阿基米德由于建造了灵巧的战争机械而对锡拉丘兹的城防做了很大的贡献。普鲁塔奇写道：

“阿基米德是锡拉丘兹的海罗大王的亲戚和朋友，他曾写信给海罗说，用任何给定的力能够移动任何给定的重物，而且正如我们所知道的，他由于受到自己的实验演示的巨大鼓舞，便宜称假如另

* 就是说，这两个重量之比是无理数，例如 $\sqrt{2}$。

外有一个世界，他又可以到那里去的话，他就能移动地球！海罗大为惊奇，要他把他的主张付诸实施，表演一下怎样用微小的力去移动很大的重物。于是阿基米德决定用一艘皇家船队的三桅货船，这种船通常要用很多劳力在岸上拉纤才能靠岸。在船上乘有许多旅客并装满了普通的货物后，阿基米德就呆在离船一段距离的地方，安静地转动他手里的一套滑轮组，毫不费力地就把船向自己平稳地拉过来了，仿佛船在水中行驶一样。”

杠杆原理在生活的各方面都起着十分重要的作用，从农民用撬棍移开重石直到现代工程技术中使用的错综复杂的机械都要用到它。阿基米德所提出的杠杆定律，使我们有可能引入作用力做功这样一个十分重要的力学概念。假定我们想用撬棍撬起一块大石头（图 I-4），其臂比是 $\overline{\alpha\gamma}:\overline{\gamma\beta}=3:1$。

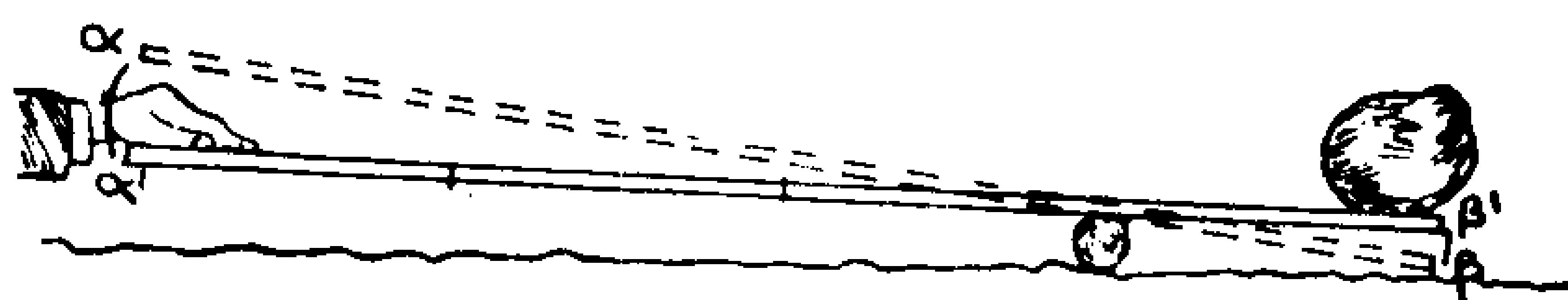


图 I-4 如果杠杆的左臂比右臂长三倍，那么左臂末端的移动 $(\overline{\alpha\alpha'})$ 比右臂末端的移动 $(\overline{\beta\beta'})$ 也大三倍。

我们在撬棍的把手处施加一个比作用在石头上的重力小三倍的压力，就能把石头撬起来。从图中可以清楚地看出，当石头离开地面比如说是 1 英寸 $(\overline{\beta\beta'})$ 时，撬棍的把手就要压下 3 英寸 $(\overline{\alpha\alpha'})$。由此可以得出结论，我们用来推动撬棍把手的力与把手向下位移的乘积，等于石头的重量与它向上位移的乘积。力与其作用点的位移之乘积，称为这个力所做的功。这样，根据阿基米德的杠杆定律，把撬棍的长端推向下的手所做的功等于抬起石头的撬棍短端所做的功。例如，家俱搬运工把一架大钢琴运到三楼所做的功，等

于他把三架大钢琴只搬到一楼上所做的功*。

杠杆的两端所做的功相等这个原理也适用于阿基米德使用过的另一种类似装置，即**滑轮**。他曾用它来移动一艘沉重的货船，使得海罗大王大吃一惊。如果我们为了升高重物，把一条附在重物上的绳子绕过一个固定于木梁上的轮子并拉动它(图 I-5 a)，那么重物升高的距离 l 将等于绳子被拉下的长度 d，作用在绳子上

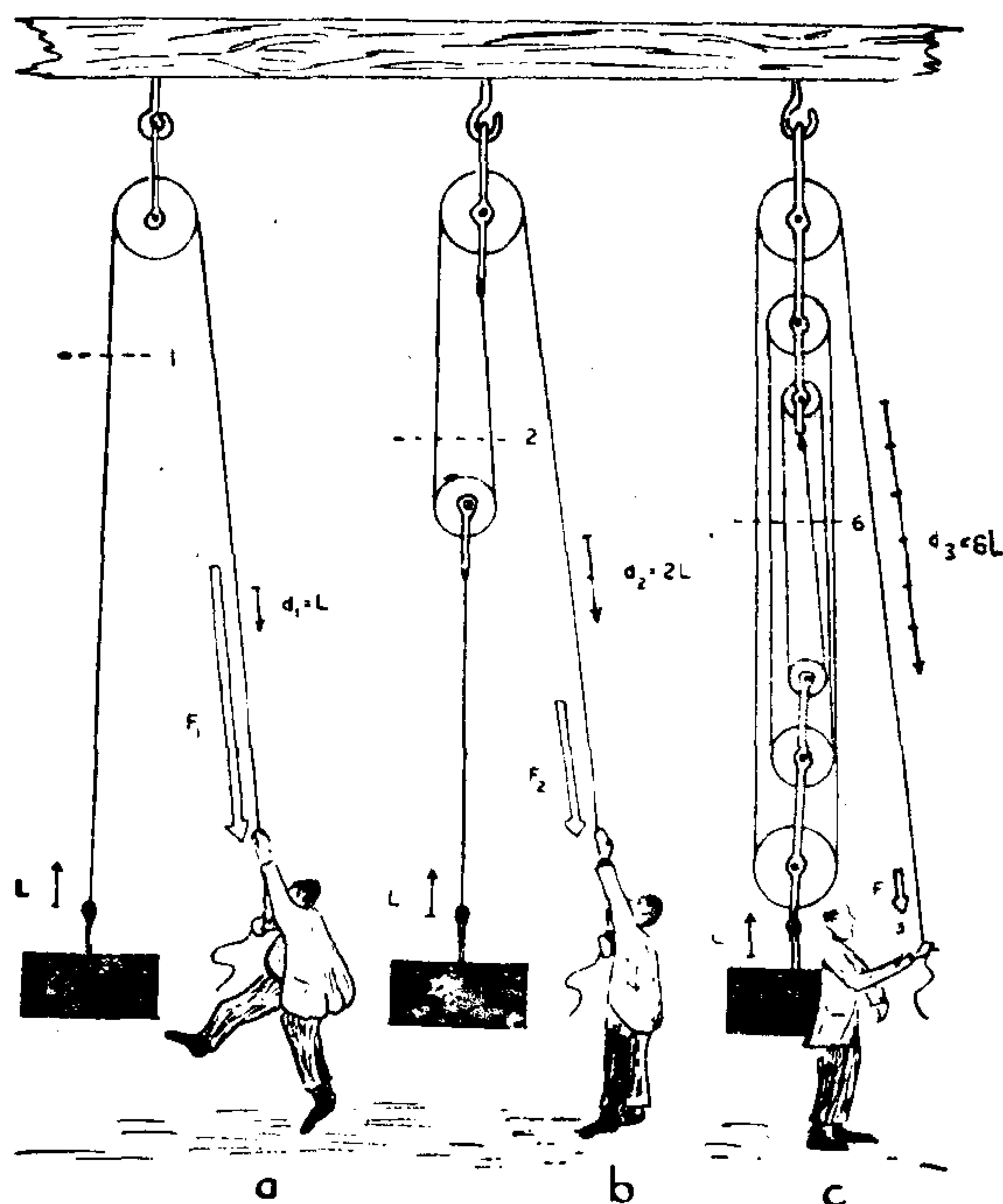


图 I-5　滑轮原理

的力 Fl 将等于重物的重量。但是，如果我们照图 I-5 b 所示那样

* 职业的搬运工也许会对这个说法提出异议，因为搬三架钢琴时要有调节绳索等等的麻烦，但我们这里所说的只是与重物的实际升高有关的功。

安装两个滑轮，我们就得将绳子拉下两倍的长度，而所要用的力只等于重物重量的一半。在图 I-5 c 所示的装置中，升起重物所需要的力只是重量的六分之一，但重物升起的高度，也将只有绳子被拉下长度的六分之一。

阿基米德的浮体定律

阿基米德所完成的一个最著名的发现，大概就是他的关于浸入液体中的物体失重的定律了。维特鲁维乌斯曾用下面这样的话来描述导致这一发现的情形：

"说起阿基米德，虽然他有许多各种各样的奇妙发现，可是在这所有的发现当中，我下面将要谈到的一个也许是最精彩最巧妙的了。海罗在锡拉丘兹称王之后，为了显示自己的丰功伟绩，决定在一座圣庙里放上一顶金皇冠，奉献给不朽的神灵。海罗与承包商谈好价钱，订了合同，并精确地称出黄金交给了他。到了规定的日期，制造商送来了做工极其精美的皇冠，大王极为满意。看起来皇冠的重量与所给的黄金重量完全相符。但后来有人告发说，在做皇冠时，商人盗窃了金子，加上了等量的白银。海罗认为自己受了欺骗，实在是奇耻大辱，但又没有办法把窃贼的嘴脸揭露出来，就命阿基米德想想办法。阿基米德连洗澡的时候都在想着这件事，当他进澡盆时，发现自己的身体越往里浸，从盆里溢出的水就越多。这可找到解决问题的办法了，他一下子从澡盆里跳出来，光着身子欣喜若狂地冲回家，一边大声喊叫说他找到朝思暮想的答案了，他边跑边大声重复着希腊话："εὕρηκα, εὕρηκα"。（意为找到了！）

以此作为其发现的开端，据说他做了两件重量与皇冠相同的物体，一件是黄金的，另一件是白银的。做好之后，他把一个大容

器用水装得满满的，并把银制品放了进去。溢出来的水的体积与沉入容器中的白银体积是相等的。然后他把物体取出来，用量杯把水注入容器，以补偿溢出的水，直到恢复原来的满度。这样他就求出了与确定量的水相对应的银子的体积。

做完这个实验后，他又把金制品放入装满了水的容器中，然后取出来，照上次一样用量杯把水装满，他发现这次溢出的水没有上次那么多，稍微少了一点儿。也就是说，金子的体积比相同重量的银子的体积小多少，水也正好少多少。最后，他又用水装满容器，并把皇冠放进同样多量的水中，发现皇冠排出的水比同样重的金制品排出的水要多。因此，他基于这一事实证明了金里掺进了白银，把制造商这个窃贼的嘴脸暴露在光天化日之下了。”

他在“论浮体”一书中给出的阿基米德定律的证明虽然完全正确，但是有点繁琐。这里我们把它用现代的语言复述一下。试考虑我们把一个固体金属球放入水槽中所会发生的情况（图 I-6）。

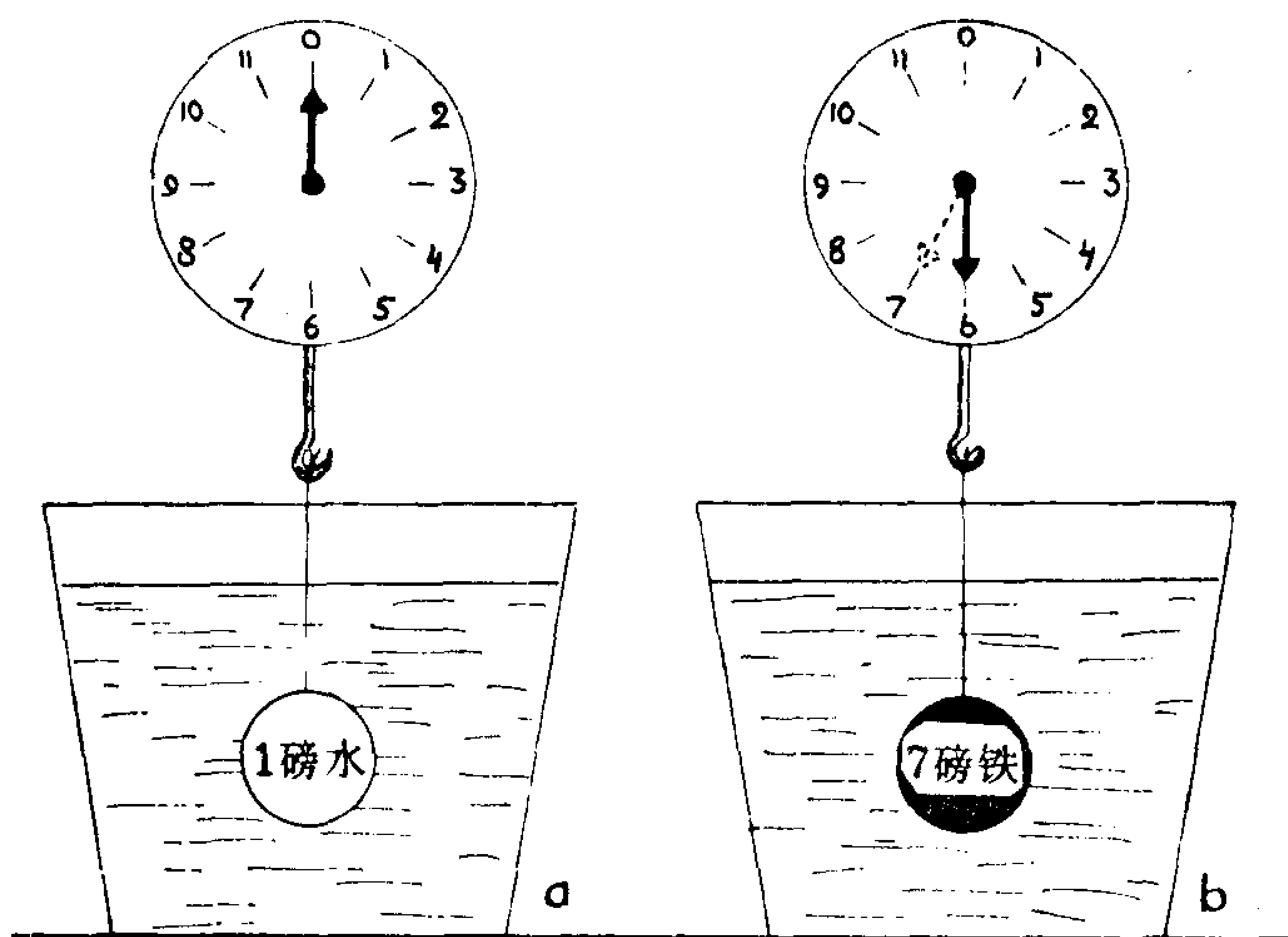


图 I-6　阿基米德浮体定律的证明

假定我们先不用铁球，而用一个直径与铁球相同的充满水的薄塑料球(图 I-6 a)。因为塑料球壳的重量可以忽略不计，这种情况就好象球壳中的水正好就是槽中水的一部分，所以刻度器上的指示将为零。现在用铁来置换球壳中的水(图 I-6 b)，铁的重量是同体积的水的七倍。因为一磅的水被槽中其余的水支撑时刻度器的指示是零，所以用铁置换水时只会增加 7－1＝6 磅，那也就是这种情况下刻度器上的读数。由此可以得出结论，在空气中重七磅的铁球，由于浸没在水中而失去了一磅的重量，这也就是它所排开的水的重量。这就是阿基米德定律，即任何固态物体浸入液体中所失去的重量，等于它排开的液体的重量。

军事顾问阿基米德

阿基米德不仅是一位伟大的数学家和力学的奠基人，而且用现代的语言来说，他还是一位"工业和武装力量的顾问"。在他的工程发明中，最著名的就是所谓"阿基米德螺旋"，如图 I-7 所示，它是用来提升水的。这种装置及其作用是不言自明的，它被广泛地用于灌溉和从矿井中抽出地下水。

阿基米德参与军事工作显然是从他给海罗大王演示滑轮实验时开始的。普鲁塔奇在"玛塞勒斯生平"一书中的描写是很富于戏剧性的，书中写道：

"海罗对阿基米德的表演感到惊奇并理解了这一技巧的功效，于是，他说服阿基米德为他准备一些攻击和防守的机械，以用于任何一种攻城战。这些东西他本人从来没有用过，因为他的大半生都是在没有战争以及和平的喜庆典礼中渡过的，但现在这些器械以及它们的制造者却给锡拉丘兹人带来了很大的益处。

当罗马人从海上和陆地向锡拉丘兹人进攻时，锡拉丘兹人全

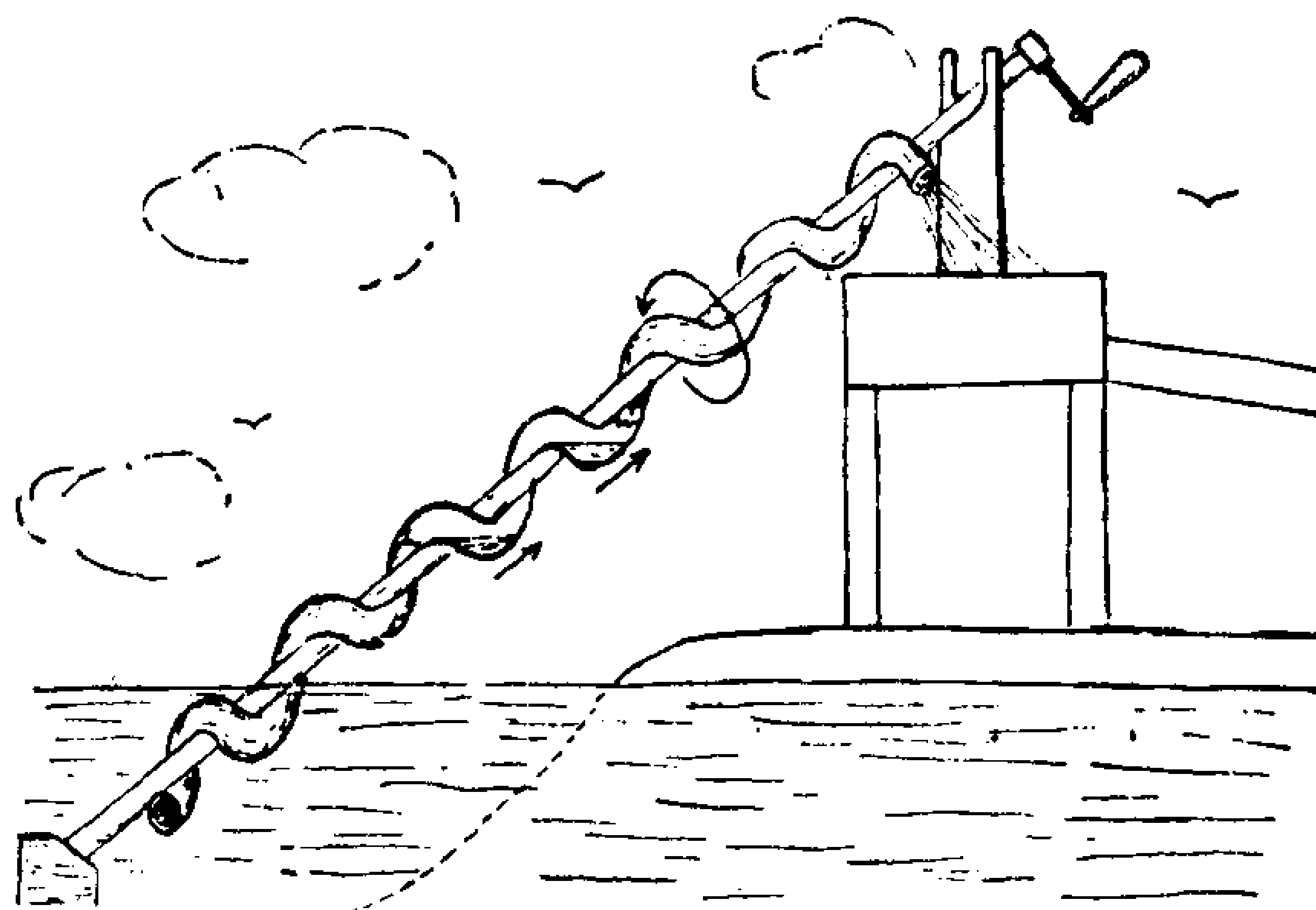


图 I-7　只要旋转阿基米德螺旋就可以抽水，为了理解它是怎样工作的，试设想管子的下部在转动时所发生的情况，读者就会发现管子本身并没有向上移动，只是存水的最低位置移动了。用金属做一个螺旋并观察它绕轴转动时的情况，也许有助于理解这一点。

被吓呆了，觉得简直毫无办法来抵挡罗马人如此可怕的攻击。但这时阿基米德开始使用了他的机械，他向陆上进攻的敌人射出了各种飞弹和大量巨石，它们以惊人的速度呼啸着倾盆而下，敌兵根本无法招架，一堆堆地被打倒在地，队列也被打得七零八落。同时，巨大的木梁突然从城墙射到敌船上，沉重的重物从高处掉下来，击沉了一部分船只，其余的则被铁爪或类似起重机铁嘴似的铁钩抓住船头，直吊上空中，而船尾朝下陷进深水，或被城里的机械搞得团团转，被城墙下面凸出的悬崖峭壁撞得粉碎，给失事船上的战斗人员造成极大的伤亡。而且，战船往往会离开水面，被举到半空，忽东忽西地乱转，就象被悬挂起来一样，形成一幅极其可怕的景象，直到全体船员向四面八方被抛出去，这时空船就会落到城墙上，或者脱开抓住它的铁钩掉下水去。至于玛塞勒斯自己带到船桥上的机械（这种机械因为有点象一种叫做塞姆布卡的乐器，所以

被称为“塞姆布卡”。)，当它到城墙还有一定距离的时候，一块十泰伦重的石头就射到它上面，接着又是第二块，第三块，有些石头带着巨大的声响砸过来，摧毁了机械的基础，使其粉身碎骨，从台架上垮下来，搞得玛塞勒斯狼狈不堪，不得不下令让他的船队尽快返航，而他的陆上军队也只好撤退了。

后来，在一次军事会议上，罗马人决定，如有可能，就先在夜间到达城下，他们以为既然阿基米德在他的机械中所用的绳子能给飞石以巨大的推动力，它们也就可能使飞石从他们头顶上方飞过去，而不会在近处发挥作用，因近处没有可供投射的空间。但是，阿基米德似乎早就准备好对付这种紧急情况的机械了，它们适用于任何距离和短程发射，通过城墙上接连开出的许多小孔，这些称为“投石机”的近程机械能瞄准近处目标而不被敌人发觉。

所以，当罗马人到达城下以为自己没有被发现时，就再次遇到了暴风雨般的飞石，巨大的石块几乎笔直地向他们砸下来，墙上各处都向他们射出利箭，于是他们又败退了。接着，当他们退开一定距离时，飞石又飞上前来落到他们头上，许多船只也互相撞毁了。他们根本无法报复自己的敌人，因为阿基米德把他的机械大部分建造在紧靠城墙背后，罗马人好象是在跟神灵打仗一样，所以无数的灾难从看不见的地方倾注在他们头上。

玛塞勒斯逃跑了，他对自己的工匠和工程师们戏谑地说：“算了吧，跟这位几何学的百手巨人打仗时，他拿咱们的舰队象酒杯一样从海里舀水，咱们自己的塞姆布卡又这么不光彩地让他搞得一塌糊涂，他一下子就向咱们全体射来了那么多的石弹，真比神话里的百手妖怪还要厉害。”实际上，锡拉丘兹的全体居民已成为阿基米德的设计整体，他一个人主宰和运筹着一切，其它的武器都闲置不用了，当时攻城守城都只用他的机械。最后，罗马人变得如

此神经过敏，任何时候只要看见城墙里伸出一小节绳子或一根小木棍，他们也会大喊起来:“又是它! 阿基米德又在弄什么新玩艺儿打咱们了!”,接着就转身赶快逃跑。看到这些,玛塞勒斯只好打消攻打的念头,从此以后开始依靠长期的围困战术了。”

围城两年以后,公元前 212 年,锡拉丘兹终于被罗马军队占领了,一小队罗马士兵闯进了阿基米德的家,他正在后院忙着在沙子上画一些复杂的几何图形。

当一个大兵踩上去时，阿基米德用他蹩脚的拉丁话喊道:“别动我的图!”这个大兵的回答是挥动他的长矛刺穿了这位老哲学家的身躯。

公元前 137 年，当西塞罗*作为一位会计官访问西西里时，他在阿格里琴门附近发现了阿基米德墓，墓上长满了荆棘和野草。西塞罗写道:“要不是有一位阿平宁的山民发现的话,这座最有名,而且一度是最文明的希腊城市，到现在也不会知道它最有天才的一位公民的坟墓在什么地方。”

亚历山大学派

随着雅典的政治与经济力量的衰落，希腊文化的中心逐渐转移到了亚历山大里亚，它是由亚历山大大帝于公元前 332 年在地中海的埃及海岸上建立起来的，是欧洲和东方之间的贸易枢纽。那时亚历山大里亚已经发展成一座美丽的城市，有“……4000 座宫殿，4000 个澡塘，12000 名花匠，40000 名纳贡的犹太人，400 座剧场和其它娱乐场所。”它还有一所第一流的大学和一座庞大的图书馆。后来，由于凯撒下令烧掉亚历山大港的埃及舰队而引起全城大火,图书馆不幸被烧毁了。欧几里德曾在这里写了他的“几

* 译注:西塞罗是古罗马的雄辩家,政治学和哲学家。

何学原本”，阿基米德年青时也曾从锡拉丘兹到这里来学过科学知识。

在天文学方面，亚历山大里亚的代表人物是希伯楚斯，他生于公元前二世纪中叶。希伯楚斯以当时可能有的最高精度观察了星球的位置，编制了1080个星球的星表，至今天文学家还在使用它，作为有关行星位置的古代参考资料。他还发现了岁差现象，即太阳在其周年运动中通过天球赤道时与其交点不断改变位置的现象。这种现象的产生是由于地球的自转轴与其轨道平面成一倾斜角，自转轴将绕着垂直于轨道平面的直线在空间扫出一个锥体，其周期是26000年。产生这种运动的原因则几乎在一千年后才被牛顿发现。

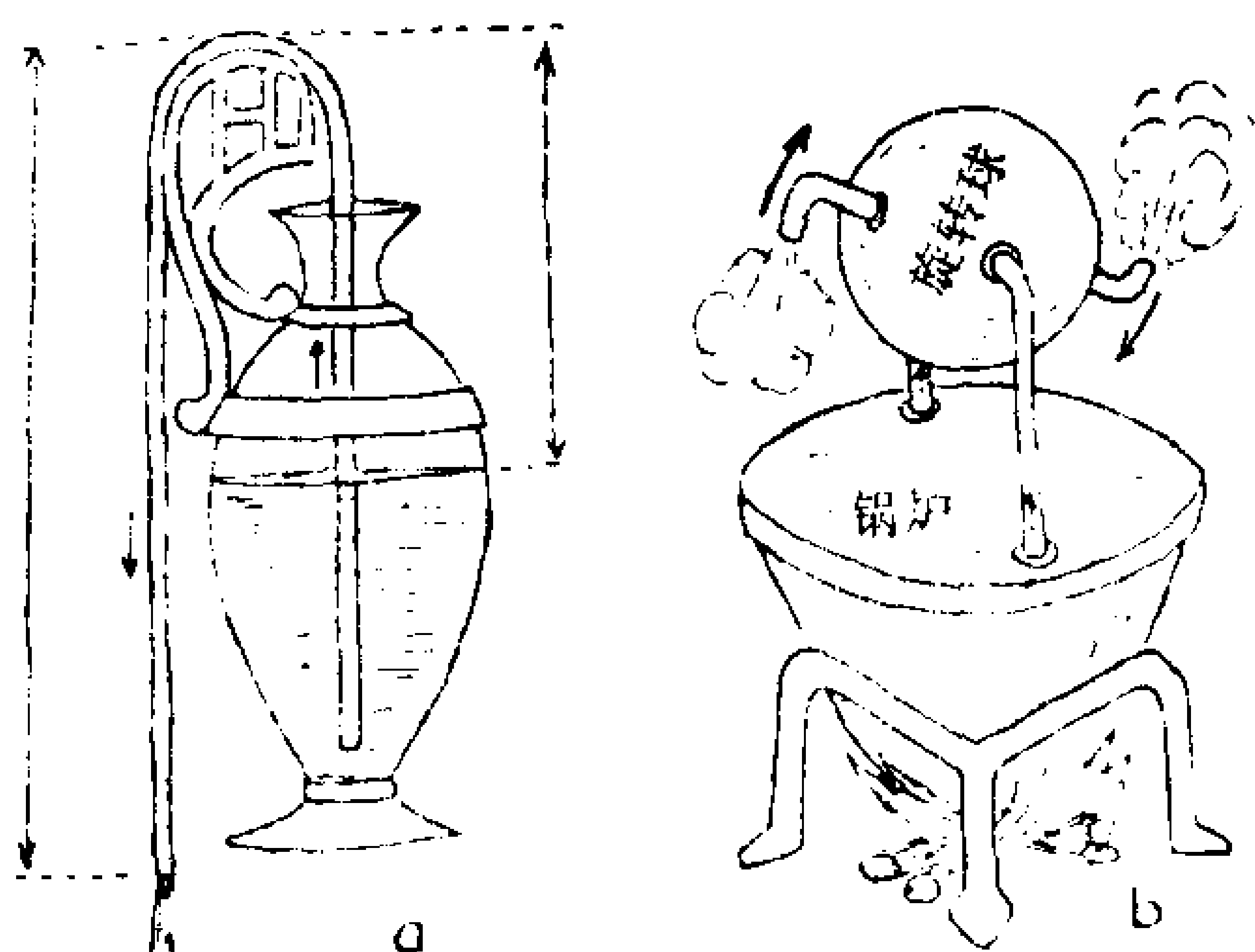


图 I-8 赫伦发明的两种装置：a)虹吸管能使容器中的水经过一根弯管全部自行流出。水通过管子运动的原因是，左边较长一部分管子中的水的重量比右边部分管子中的水的重量大，右边部分的管长实际上只从容器中的水面算到管子顶部。b)赫伦的蒸汽喷气机，其中球的转动是由两个喷嘴发出的蒸汽喷注引起的。

至于物理学方面，亚历山大学派的代表人物是赫伦，与其说他是一位物理学家，倒不如说他是一位工程发明家更为合适。他的“力学”一书中有许多正确的陈述，但也有不少糟糕的数学错误。

虽然赫伦论述力学的书中在基本问题的数学处理上有缺点，但书中也描述了大量有用的机件，诸如滑轮组，各种传动装置和齿轮机构等等。在其“汽力学”一书中，他描述了虹吸原理（图 I-8 a）和蒸汽喷气机（图

I-8 b)，这种喷气机类似普通的草地喷水壶，但可以看成是现代喷汽发动机的先驱。

赫伦还写过一本名为«反射光学»的书，其内容是关于镜子的理论及其实际应用。他写道：

“反射光学显然是一门科学，值得加以研究，它可以产生使观察者感到惊奇的景象。因为借助这门科学，我们可以做成一些镜子，把右边照成右边，同样把左边也照成左边，而普通的镜子本来是有相反特性的，即照出相反的一边。”

把两面没有框架的镜子的边缘连接并相互成直角地放在一起(图 I-9)，就可以做到这一点。

“借助镜子，我们能够看到自己的背后（理发师给你看颈后的发型就是这样），也能看到自己倒过来，头朝下，有三只眼睛和两个鼻子，好象处于极度悲痛之中那样面孔发生畸变（象游艺场镜馆里的情形那样）。

有时，虽然我们呆在自己家里，但也能看到街上有多少人，看到他们正在干什么，谁能不相信这是很有用的呢？”

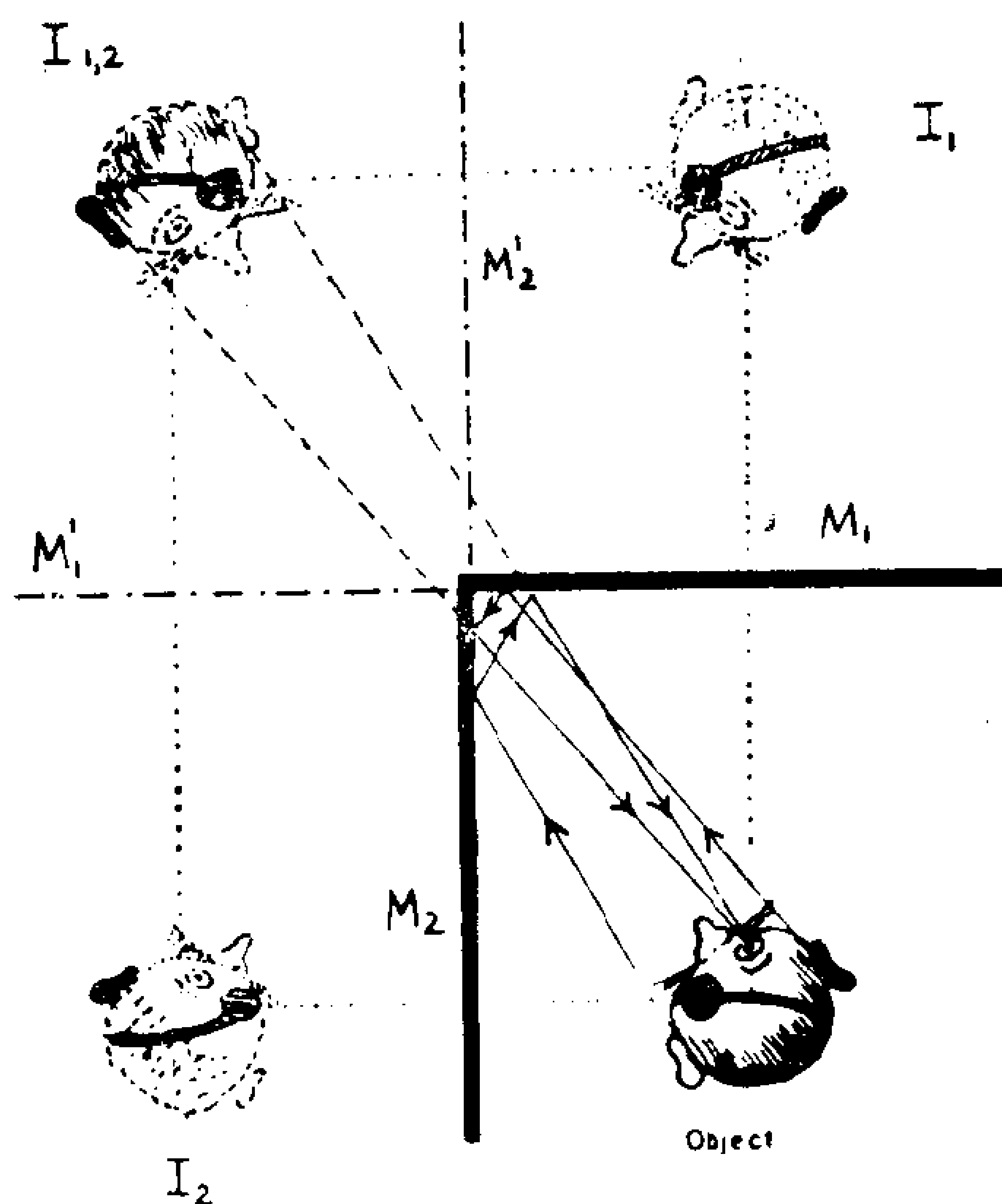


图 I-9　从两块边缘连接互相垂直的平面镜 M_1 和 M_2 所组成的复合镜看进去，我们可以看到自己的像被两次反射：先被镜子 M_1 反射，然后被镜子 M_2 的想象的延长部分 M'_2 反射；或者先被镜子 M_2 反射，然后被镜子 M_1 的想象的延长的部分 M'_1 反射。由于两次反射，右边仍在右边，左边仍在左边。实际的光线用实线表示。

赫伦关于光的本性的观点，从下面一段引文中可以明显地看出：

“实际上，所有写过屈光学问题的人都有疑问，为什么从我们眼里发出的光线会被镜子反射，为什么又以相等的角度反射。我们的视线从视觉器官发出时是沿着直线进行的，这个命题现在可以证实如下。因为任何以不变速度运动的东西都是沿直线运动的。我们看到弓上射出的箭，可以做为一个例子。由于推力，箭在运动中力求走过尽可能短的距离，因为它没有时间使运动变慢，就是说，没有时间走过更长的轨道，推力不允许有这样的耽搁。所以，由于箭的速度，它倾向于走最短的路径。但是，在所有有相同终始端的线中，最短的就是直线。从下面的考虑就可了解我们眼中所发出的光线是以无穷大的速度运动的，当我们闭上眼睛后再睁开来观看天空时，并不需要什么时间视线就到达天空了。确实，尽管星星的距离可以说是无限远，当我们去看它们时立刻就看到了。而且，如果星星的距离再增大，结果还是一样，所以，光线显然是以无限大的速度射出的。因此，它们若不受阻碍或被弯曲，总是沿最短的路径即直线运动。”

这段话揭示了一个可笑的事实，即赫伦和他所有同时代的人都以为视觉的产生是由于眼睛发出了某种射线被物体反射回来，今天的雷达所依据的正是这个原理。

亚历山大里亚的另一位伟大人物是克劳迪亚斯·托勒密*(不要和纪元前在埃及统治多年的托勒密王朝的人混淆了)，他生活在公元二世纪的前半期。托勒密对恒星和行星的观察，都收集在他

* 译注：托勒密是埃及著名天文学家及地理学家。主张天动学说，即认为地球位于宇宙中心不动，而日月星辰均绕地球运动，在十五世纪哥白尼的地动说之前，他的天动说深入人心，牢不可破，哥白尼及布鲁诺等人为了打破他的天动说作了艰苦的斗争。

的一本名为《伟大论》* (*Almagest*)的书中，对希伯楚斯早在两个半世纪之前所得到的资料做了相当可观的补充。他对物理学的重要贡献包括在其《光学》一书中，我们今天见到的是从佚散的阿拉伯文译本转译的拉丁文译本，而阿拉伯文本是从希腊文手稿译出的。托勒密在这本书里讨论了许多问题，其中包括光从一种介质进入另一种介质时发生折射这个重要的课题。他写道：

"可见光可以有两种方式改变路径：一是被反射，即被物体反弹回来，这种物体称为镜子，光线不能穿透；一是在介质中被弯曲(即折射)，这时光线能穿透介质，这种介质有一个共同的名称(透明物质)，因为可见光线能够穿透它们。"

托勒密用下面一个简单的实验说明了折射现象：把一枚硬币放在一只装满水的称为"洗礼盆"**的容器底部(图 I-10 a)。他写道：

"假定眼睛的位置使得它所发射的可见光线刚好通过洗礼盆的边缘到达比硬币略高的地点。然后让硬币保持原地不动，慢慢向盆里注水，直到从盆边射过去的光线向下弯曲刚好落到硬币上为止。结果是，原来看不到的物体现在顺着从眼睛通到物体真正位置上方一点的直线可以看到了。但观察者不会假定视线已经弯向物体，而会认为物体自行浮了起来，向视线方向升高了。因此，物体将会出现在从它向水面所作的垂直线上。"

托勒密后来在书中又描述了一个实验，想仔细研究一下光的折射定律。

"光在水中产生并能被观测到的折射量，可以用我们借助铜盘检验平面镜定律时所做的那个实验来确定。在这铜盘上作一个圆

* 译注：一译"天论"。

** 大概是教堂中用来给孩子施洗礼的盆子。

$\alpha\beta\gamma\delta$（图 I-10 b），圆心是 s，再作两条直径 $\alpha s\gamma$ 和 $\delta s\beta$，使其交为直角。把每个象限分成 90 等份并在中心放上很小的颜色标记。然后把圆盘垂直地放在一只小水盆中，并向盆里注入适量的清水，使视线不受阻碍。让盘面竖立与水面垂直，并被水面一分之二，于是正好有半个圆 $\beta\gamma\delta$ 完全处在水下，让直径 $\alpha s\gamma$ 垂直于水面。

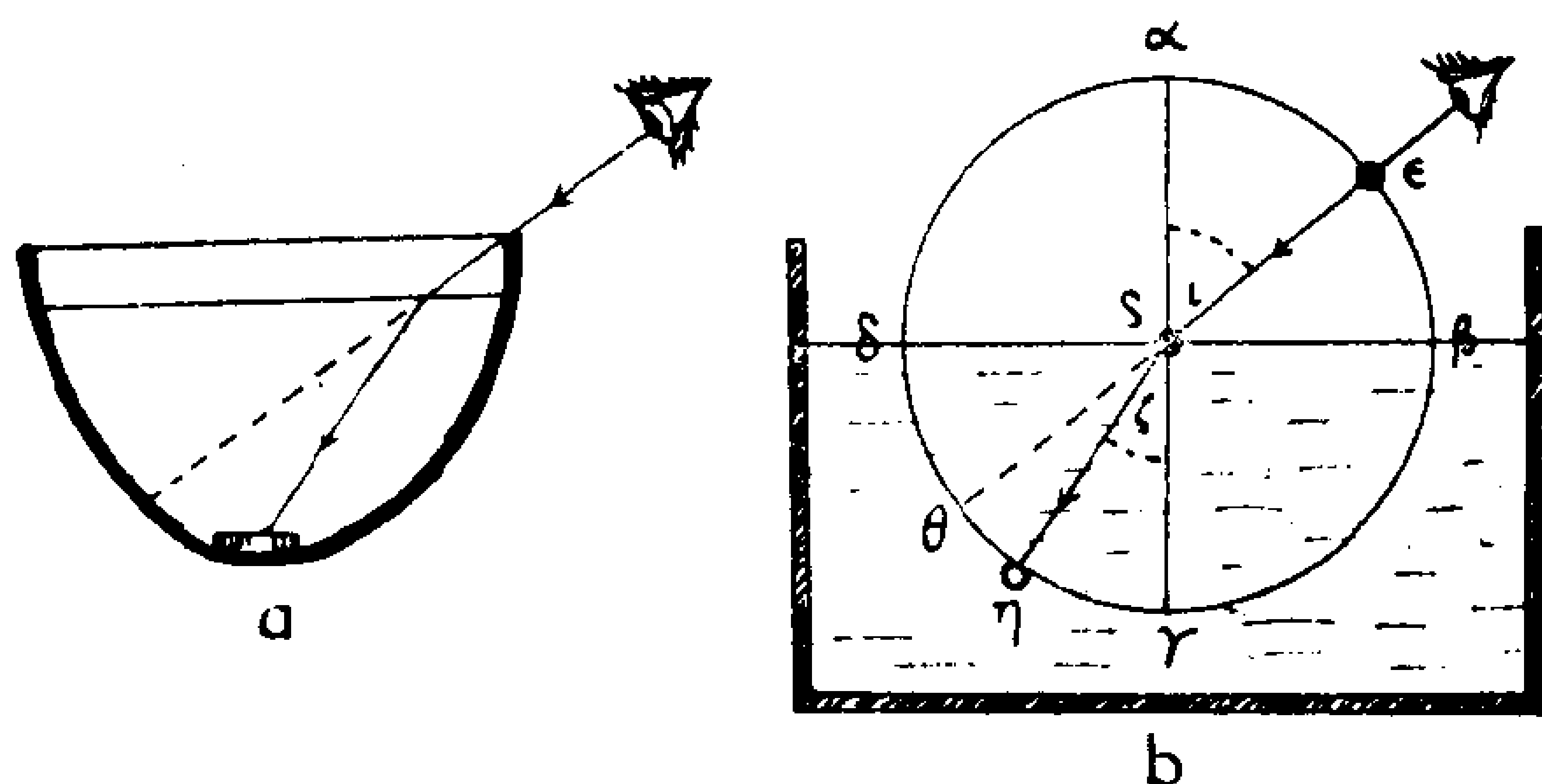


图 I-10 托勒密研究光的折射的实验：a）放在装满水的容器底部的硬币，看起来比它实际的位置要高。b）研究光的折射装置。托勒密测量了水中角 $\delta s\eta$ 与空气中角度 $\alpha s\varepsilon$ 之间的关系，并把它们之间的关系列成表。

今从 α 点取一点已测的弧长，例如 $\alpha\varepsilon$，它位于水平面上两个象限之一中，在 ε 上放一小的颜色标记。用一只眼睛瞄准去看，直到 ε 和 s 上的标记两者都出现在与眼睛成的一条直线上。同时，在对面一个水下的象限中沿着圆弧 $\gamma\delta$ 移动一根细小的杆，直到细杆的一端与圆弧的交点是处在 ε 与 s 联线的延长线上。现在，如果我们测出 γ 点与 η 点之间的弧长（在 η 点，细杆出现在上述延长线上），我们将会发现这段弧长 $\gamma\eta$ 总是小于弧长 $\alpha\varepsilon$。

如果我们让眼睛沿着垂线 αs 看，视线就不会弯曲，而会落在对面的 γ 点上，并与 αs 处于同一直线上。而在任何其它位置，当弧 $\alpha\varepsilon$ 增大时，弧 $\gamma\eta$ 也增大，但射线的弯曲量将逐渐变大。

当 $\alpha\varepsilon$ 是 10°时	$\gamma\eta$ 为 8°	弯曲量是 2°
20°	$15\frac{1}{2}°$	$4\frac{1}{2}°$
30°	$22\frac{1}{2}°$	$7\frac{1}{2}°$
40°	29°	11°
50°	35°	15°
60°	$40\frac{1}{2}°$	$19\frac{1}{2}°$
70°	$45\frac{1}{2}°$	$24\frac{1}{2}°$
80°	50°	30°

这就是我们求水中折射量的方法。”

托勒密还用类似的方法研究了光线在空气和玻璃的交界面上的折射，并发现在这种情况下光线的弯曲更大。但是，托勒密没有试图(或者是做过，但至少是没有取得成功)用数学公式把他的观察结果表达出来。表达光的折射定律的数学公式直到十七世纪才被发现。颇具讽刺意味的是，他本来可以轻而易举地做到这一点，因为用公式表达这个定律所需要的数学工具乃是弧度和弦长之间的关系，而这早在他一个半世纪以前就已由普鲁塔奇研究过了，托勒密本人在《伟大论》中谈到天文观测时也用很大篇幅阐述了这一关系。

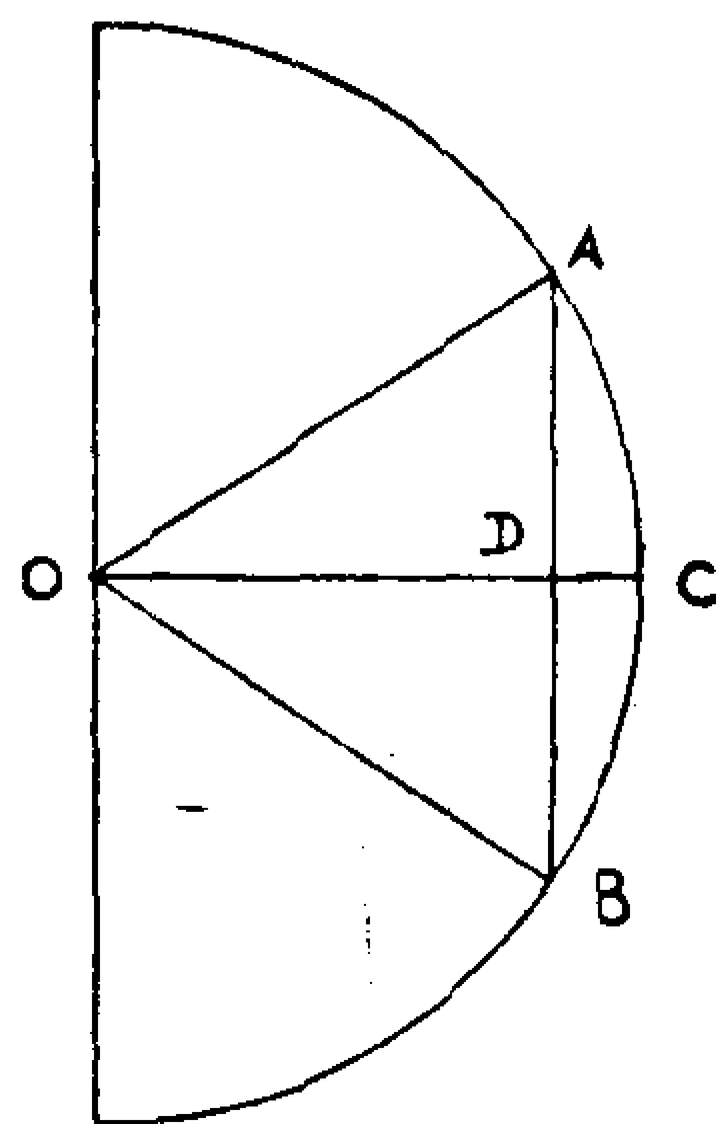


图 I-11　普鲁塔奇的“弦长表”与现代的三角函数表之间的关系。普鲁塔奇把不同的弧长 ACB 所对应的弦长 ADB 列成了表格。在现代三角学中，人们是用长度 AD（弦长的一半）对弧长 AC 制表。长度 AD 称为角 AOC 的正弦，长度 OD 则称为该角的余弦。

问题是要求出具有单位半径的圆中弧 ACB 所对应的弦长 ADB（图 I-11）。托勒密用很巧妙的数学方法编制了一个表，下面摘录其中的一部分：

弧度	弦长	弧度	弦长	弧度	弦长
116°	1.014557	$117\frac{1}{2}°$	1.023522	119°	1.032344
$116\frac{1}{2}°$	1.020233	118°	1.025137	$119\frac{1}{2}°$	1.033937
117°	1.021901	$118\frac{1}{2}°$	1.030741	120°	1.035523

这个表相当于现在所说的正弦三角函数表，唯一的区别在于现在是用半弧长(即角 AOC)和半弦长 AD。在单位圆情况下，长度 AD 称为角 AOC 的正弦，长度 OD 则称为角 AOC 的余弦。三角函数在解决既包括长度又包括角度的几何问题时是极为有用的。

如果托勒密把他关于光折射的实验结果与他的正弦表作一比较的话，他就会发现入射角的正弦与折射角的正弦之比对给定的两种介质来说是一个常数。他没有这样做，结果这个折射定律一直没有被发现，直到十四个世纪以后，它才由荷兰的天文学家和数学家斯奈尔发现。以后我们将看到，斯奈尔定律对理解光的本性是有着极其重要的意义的。

托勒密的工作是古希腊文化对科学发展的最后一个伟大贡献。在他死后，亚历山大学派的科学研究很快就开始衰落了。与亚历山大学派有关的人物中，最后一个值得一提的名字也许是海帕蒂，她是数学家西恩的女儿，是一位科学和哲学教师。她生于罗马朱理安*帝国统治时期，朱理安曾力图保护希腊文化和希腊神

* 译注：朱理安(331—363)罗马皇帝，是君士坦丁大帝的侄子，自幼好学，335 年授"凯撒"衔，曾统治高卢，屡次打败日耳曼人。361 年被拥戴为皇帝，在征波斯时被刺死。此人长于文学，善词令，尤其善于写诗，著作很多。

的偶像，使之不受力量日益增长的基督教的侵犯。朱理安死后出现的复古运动引起了公元 415 年由亚历山大里亚的克瑞勒主教所组织的反希腊大暴动。海帕蒂被基督教暴徒撕成了碎片，这个城市的图书馆遗迹也都被毁了。

第二章　中世纪和文艺复兴

随着希腊文化的毁灭，一般科学，特别是物理学的发展完全停顿了。在人类历史的这一段时期曾经统治过世界的罗马人对抽象思考很少关心，他们的文化成了“实业家的文化”。尽管他们也鼓励研究学问，但主要是对实用问题感兴趣。罗马帝国衰亡之后，情况更是糟糕，在帝国的废墟上建立起来的封建国家当然也不是任何科学发展的沃土。在这整整一千多年的漫长时期中，唯一统一的刺激品就是基督教，大寺、教堂和修道院成了文化的中心。因此，当时主要的兴趣是集中在理性问题上，古希腊文化衰落后遗留下来的不管什么科学思想都屈服于宗教的专政之下。托勒密的天动说——即认为地球在中心是静止的，而太阳、行星和恒星绕着它运动的理论，被公认为不可动摇的信条。因为这种理论最适合于梵蒂冈处于中心地位这样的概念，认为梵蒂冈乃是上帝在地球上挑选的使者所居住的地方。“科学”讨论都被局限在诸如一个针尖上能有多少个天使在跳舞以及上帝是否能造出一块他自己也举不起来的大石头之类的问题。原始的“李森科主义”席卷了整个欧洲，神圣的宗教裁判所无情镇压着任何背离宗教信仰的思想。

对我们来说幸运的是，希腊科学在公元七世纪期间新生的阿拉伯帝国找到了避难所，帝国并吞了地中海整个南部的土地，直到狭窄的直布罗陀海峡对岸的西班牙。“一千零一夜”故事中的仁慈的君主哈伦·阿尔拉齐德于公元800年在巴格达建立了一所科学学校，同时，西班牙的科尔瓦多市也成了阿拉伯帝国在欧洲土地上

的文化中心。阿拉伯学者们研究和翻译了从部分被毁的希腊人图书馆中抢救出来的希腊手稿，举起了科学的旗帜，而当时的欧洲正被窒息在中世纪经院哲学的桎梏之中。科学史上的阿拉伯时代，可以由一些延用至今的科学名词得到证明，诸如代数、酒精、碱、汞合金、日历等等。阿拉伯人在数学方面有了长足的进步，发展了希腊人所不知道的代数学，引进了阿拉伯数字，使得计算比用罗马制方便多了。但是，也许是由于受了斯开赫茨德(Scheherzadé)的童话故事的影响，他们在天文学和化学方面的工作几乎都是局限于追求一些荒诞的目的，例如根据一个人出生时星座的位置来预言他的一生（占星学）以及寻找把普通物质变为贵重黄金的方法（炼金术）等。他们在物理学方面似乎没有做什么工作，但是，炼金术当然也可以看成是把一种化学元素变为另一种化学元素的现代技术的先驱。然而，“当摩尔人完成了他的使命时，摩尔人就一定走了”，十二世纪时，由于成吉思汗的入侵和基督教十字军对圣地（巴勒斯坦）的持续征讨，阿拉伯王国很快就被征服了。

这时候，欧洲国家正在慢慢从中世纪的浑沌状态中苏醒过来，学术研究又开始发展起来了。公元 784 年，法兰克帝国的统治者查理曼大帝*命令他的广大领土上所有的教堂都必须附设学校，公元 1100 年，巴黎大学建立了。不久以后，又建立了波洛尼亚大学、牛津大学和剑桥大学，它们很快成为公认的学术活动中心。常规的学习课程计有“三学科”和“四学科”，前者包括拉丁语法、修辞和逻辑，后者包括算术、几何、音乐与天文。但是，教育仍然处在教会的严格监督之下，各基督教国家的大学必须得到罗马教皇的批准

* 译注：查理曼大帝(742—814)，是法兰克国王丕平(*Pepin*)的儿子。768 年和他的哥哥一同即位，其兄死后就独掌政权，征服了萨克森人和伦巴底人，统一西欧，于 800 年由教皇加冕为西罗马皇帝。他奖励发展工业和农业，鼓励科学的发展，对复兴文化起了一定作用。欧洲的封建制度从他起开始盛行。

才得以继续存在。学习主要是依据亚里斯多德的著作，那是由阿拉伯人翻译后传入欧洲的。前面说过，亚里斯多德虽然在其它许多方面有着辉煌的成就，但在物理学领域里就相形见绌了，肯定不会有助于刚刚从千年沉睡中苏醒过来的欧洲物理学的复兴的。

在知识传播的种种重要因素中，有一个因素是十五世纪中叶在德国的梅恩兹一个名叫福斯特的人的工场中发明了印刷机。在这些早期的印刷品中，最重要的一本书无疑是哥白尼所著的《天体运行论》了（公元 1543 年在纽伦堡出版），他在书中确立了以太阳为中心的新的世界体系。但是为了避免被教会放逐，书中不得不加了一个前言（也许是由出版者奥仙德自己写的，没有让哥白尼知道），前言里说，书中所表达的全部思想只有纯粹臆测的性质，无非是一种数学练习，而不是对真实物体的描写。

开普勒的雄辩与开普勒定律

在这一时期中，占星学与真正科学的混杂也许可以从开普勒所著《神密的宇宙》一书中引述的下面一段话得到最好的说明，开普勒是行星运动的基本定律的发现者。这本书是开普勒献给支持他从事研究的德国贵族的，书的开头写道：

"向著名的、高贵的和公正的爵爷，西格斯蒙德·弗里德里克，赫伯斯坦的男爵……向著名的施蒂里亚领地的最高贵的爵爷，光荣可敬的五人委员会，我那善良和慈悲的老爷们，致以我的

祝愿和谦恭的敬意！

七个月前我曾答应写一本书，据学者们判断，它是一本精彩而给人印象深刻的书，远比一切年历之类的东西要好，现在我向你们——仁慈的朋友、高贵的先生们献上这本书，虽然它涉及的范围狭窄，但却是我自己真诚努力的成果，而且讨论的是一个奇妙的课题。假如你们追求完备，那么，毕达格拉斯早在两千多年以前就已经讨论过它了；假如你们追求新奇，这个课题却是由

我第一次向全人类提出的。假如你们追求广度，那就没有什么东西比宇宙更宏大更宽阔了；假如你们追求尊严，没有什么东西比上帝的宏伟壮丽的殿堂更高贵、更美丽了。要是你们希望知道秘密，自然界中从来没有什么比它更奥妙的了。尽管如此，我的目的不会使每个人都满意，因为它的用处对不爱思考的人来说并不明显。我所说的是关于自然界的"圣经"，自然界在圣经中是得到如此高度的尊重，圣保罗*曾劝异教徒考虑一下他们之间的上帝，就象他们考虑水中或镜子里的太阳一样。为什么基督徒就不太喜欢去做这种考虑，而认识到以真诚地推崇、尊敬和赞美上帝为己任呢？我们在这方面的虔诚越深，我们就觉得天地万物越伟大，越壮丽崇高。确实，上帝的忠实奴仆大卫**为造物主唱了多少赞美歌啊，而造物主不是别人，正是上帝本人！他在这里谦恭地详细谈论了诸神的瞑思默想。他唱道，诸神都把光荣归于上帝。天空是您的双手创造，月亮和星星是您的安排。上帝是我们的主宰，上帝的权力无边无际；上帝点数着众星辰，并用星辰的名字来把它们分辨。在圣灵的感召下，他到处欢乐地向整个宇宙大声疾呼：赞美上帝吧！赞美他，赞美太阳、月亮和这一切！"

接着，我们读到：

"整个世界以一个球面为界，这一点已经由亚里斯多德（在他论天的书中）详尽地讨论过了，他把他的证明完全建立在认为球面有着特殊意义这一基础上。正是由于这个原因，即使是现在，星辰固定在其上的最外层的球面也一直保持着这种形状，尽管没有什么运动可以与之发生联系。在世界的最内层，可以说是以太阳为中心。从星球的圆周运动，可以看出其余的轨道都是圆形的。这样，我们就不必去进一步证明要用曲线来装饰这个世界了。然而，在世界上有三种量，即物体的形状、数目和容积。曲线只说明形状。这里，容积是不重要的，因为一种结构可以同轴地内接于类似的结构中（例如球内接于球，环内接于环），不论它们是处处相接触还是根本不相接触。球形既然代表着一种绝对唯一的量，它就只能被'三'这个数字所支配。"

---

* 译注：圣保罗是耶稣的弟子。原名扫罗，生于西里西亚，开始不信耶稣，曾虐杀耶稣的教徒，后来受了感化，尽力传道。公元65年被罗马皇帝尼禄所杀。

** 译注：基督教圣经中记载的古以色列国王，童年时杀死勇士哥利亚。

当开普勒写下这些华丽的词藻时，他正在努力研究一个比较平凡的问题：行星运动的精确规律。在“天体运行论”一书中所提出的哥白尼体系，认为行星轨道是圆形的，这是符合希腊哲学的古老传统的，希腊哲学认为圆是完美的曲线，而球是完美的形体。但是，这种看法并不很符合丹麦天文学家第谷在其私人天文台对行星运动所作的精密测量。这座天文台位于哥本哈根附近的小岛乌兰尼堡上。开普勒是第谷的学生和助手，他按照自己的意愿，从研读欧几里德和其它希腊经典著作中学到了丰富的数学知识，从而决定解决行星轨道的精确形状及其运动所遵从的规律问题。经过多年的工作，他得了他的第一个重要发现。他发现行星在绕太阳运动时，并不是精确地遵循圆形轨道，而是描绘出另一类曲线，这类曲线和圆一样，在古老的欧氏几何中也是有名的。它们称为圆锥曲线，可以用圆锥体与不同取向的平面相截来确定(图 II-1)。如果平面与圆锥的轴相垂直，截面上得到的当然是一个圆。但如平面与圆锥轴成一倾斜角，我们就得到一个被拉长的封闭曲线，称为椭圆。当平面变得与圆锥的母线平行时，椭圆的一端就消失于无限远处，我们就得到一个开口曲线，称为抛物线。再进一步倾斜时，原来的抛物线就变得

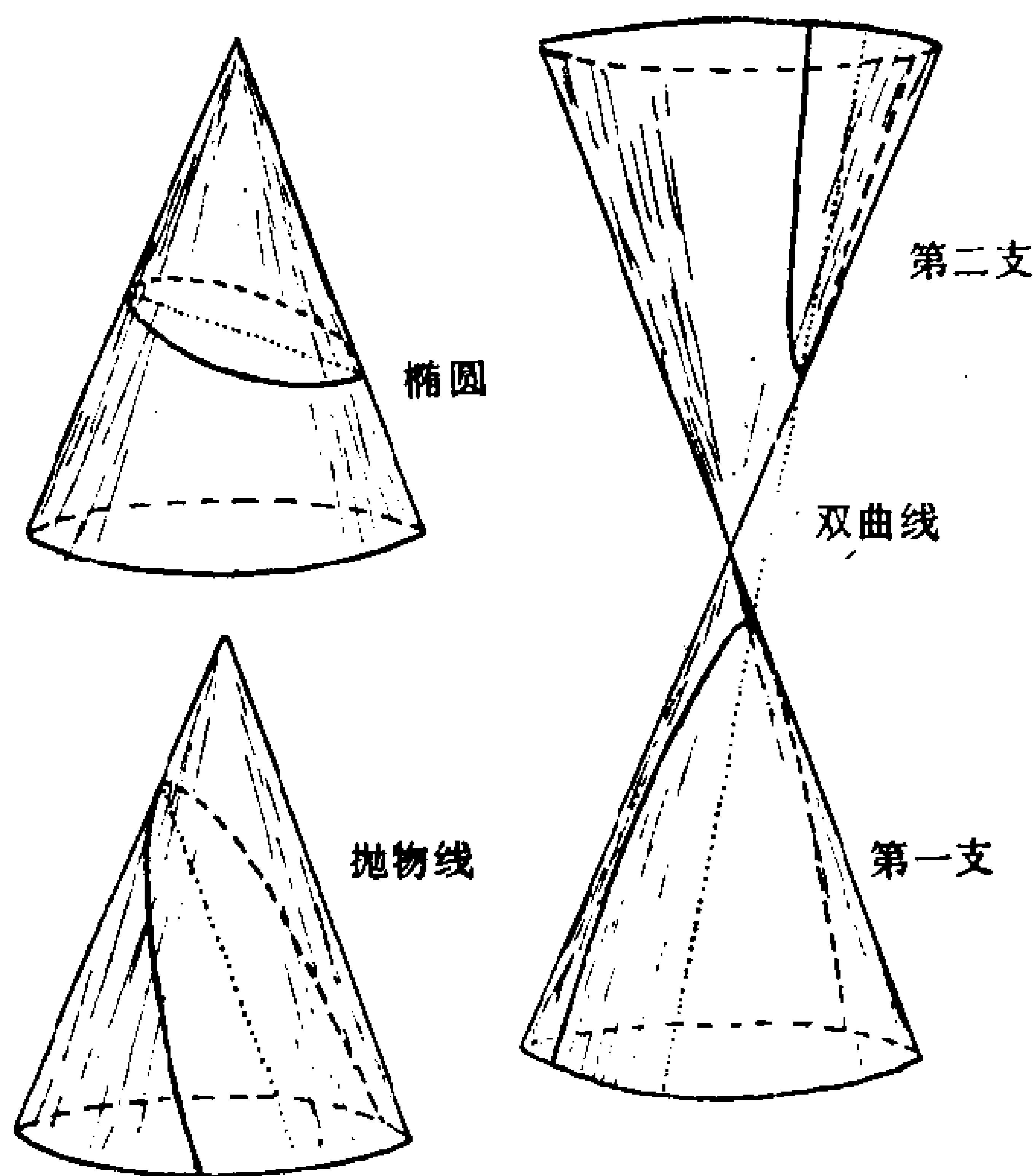


图 II-1 平面以不同角度切割圆锥时所得到的圆锥曲线

更“开”了，变成所谓双曲线。应当注意，在双曲线情况下，实际上是有两个不相联接的分支，第二个分支是平面与第二个对顶的锥体相交而成的。椭圆也可以定义为这样一些点的集合：其中每个点到两个被称为焦点的固定点的距离之和永远是相等的。因此，用一条绳子在两端系上揿钉并钉在纸板上，然后移动铅笔使绳子总是绷紧，我们就能画去一个椭圆。类似的，双曲线是所有的到两个焦点的距离之差保持为常数的点的集合（图 II–2 a），这就使我们提不出什么方便的实用方法来画双曲线了。

在分析第谷关于行星在恒星之间的位置的实测数据时，开普勒得出如下的结论：如果认为所有的行星都是遵循椭圆轨道运动，而太阳位于一个焦点上，一切就会符合得很好了。他还发现在行星绕日的运动中，当它们离太阳较近时运动得较快（近日点），远离太阳时运动得较慢（远日点）。行星在轨道上各点运动的速度和它到太阳的距离之间的关系是这样的：假想在行星和太阳之间联一直线，则此直线在相等的时间间隔内扫过轨道上相等的面积（图 II–2 a）。这两个基本的行星运动定律是开普勒在 1609 年宣布的，称为开普勒第一定律和第二定律。

发现了个别行星的运动规律后，开普勒就开始寻找不同行星之间的关系，并为了找出这个关系花了九年的时间。开普勒尝试了各种可能性，例如考虑了各行星轨道与立体几何中正多面体之间的关系，但似乎毫无所获。最后，开普勒完成了一个光辉的发现，今天我们称之为开普勒第三定律。开普勒第三定律说，不同行星绕日运行的周期的平方，与它们到太阳的平均距离的立方成正比。在图 II–2 b 中，我们画出了所谓内层行星——水星、金星、地球和火星——的轨道图，其距离用地球的轨道半径（所谓天文单位）来表示，它们的运行周期用年来表示。若取运行周期的平方，

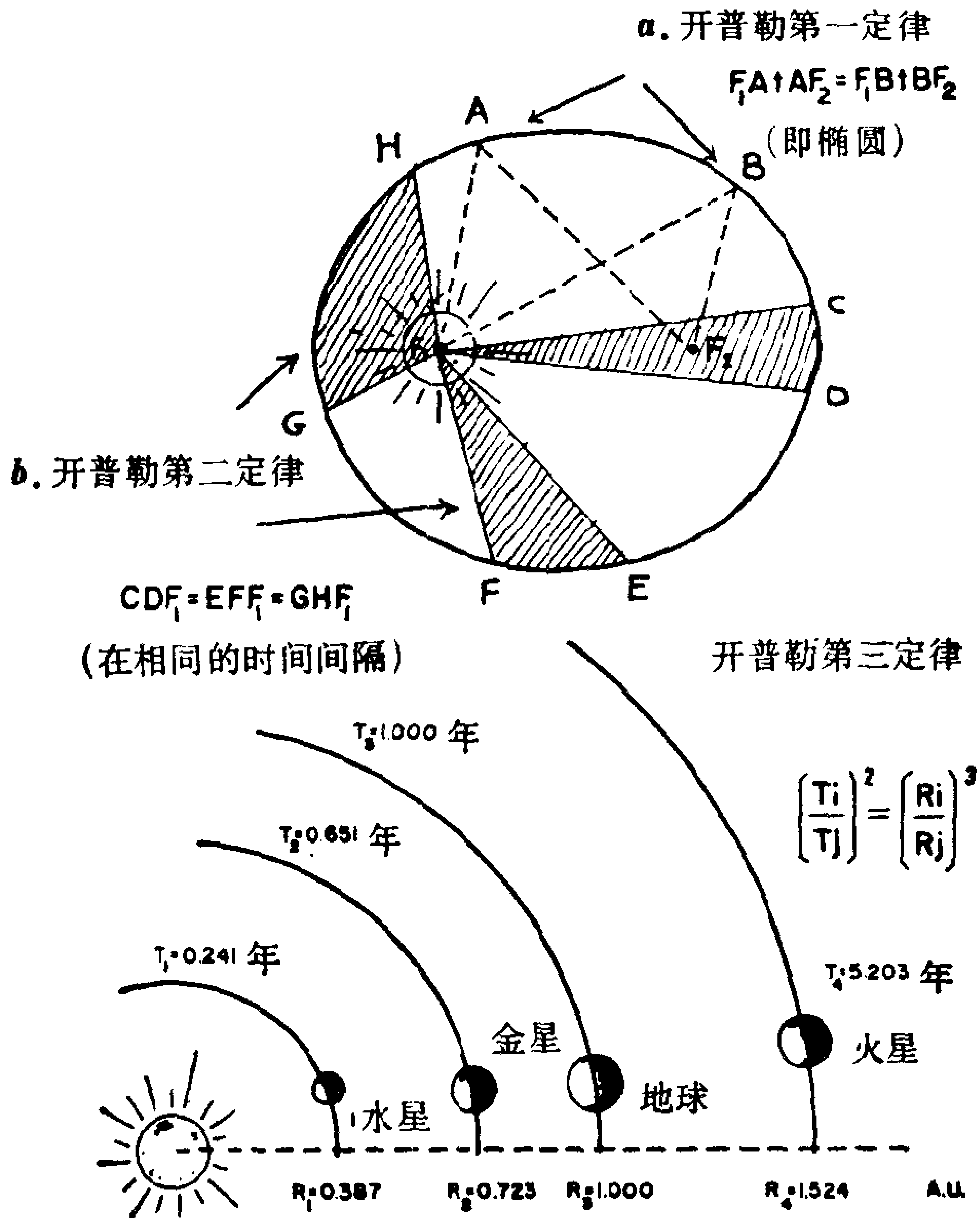


图 II-2 开普勒的行星运动定律
(译注:原图有错,金星周期应为0.616年,火星为1.882年)

我们可以得到数列

0.058　　0.378　　1.000　　3.540

而取距离的立方,则得

0.058　　0.378　　1.000　　3.540

上面两列数是全等的,这就证明了开普勒第三定律的正确性。

这样，早在十七世纪，科学家就已经知道了行星是怎样绕日运动的。但是为了回答它们为什么这样运动的问题，却花去了半个世纪以上的时间。

斯特文斯链

当开普勒主要的兴趣在天上的天体方面时，他的同时代人，佛兰芒的工程师西蒙·斯特文斯却更关心地下的现象，他在发展着阿基米德关于力学平衡，即一般称之为“静力学”方面的工作。斯特文斯的主要贡献是解决了斜面上的平衡问题，阿基米德显然没有触及过这个问题，而如我们在前面看到的，赫伦又用错误的方法处理了它。在斯特文斯关于静力学的一本书的封面上，画着如图 II-3 所示的一幅图，它标志着在理解平衡问题方面的一大进展。用许多金属小球（今天我们会称之为滚珠）组成一根链条，放在一个棱柱形的支承体上，棱体的每个面都是光滑（“无摩擦”）的。这会发生什么情况呢？因为棱体左边（较长的一边）的小球比右边（较短的一边）的多，有人会以为由于重量不同链子要开始从右向左运动。但既然链子是连续的，这一运动就应一直不停，链子就会永远转下去。如果真的如此，我们就可以给这个机构加上一些齿轮和传动装置来无限久地带动各种机器而无需任何消耗了，我们就可以不费代价地作功，人类受益的程度就会比“和平

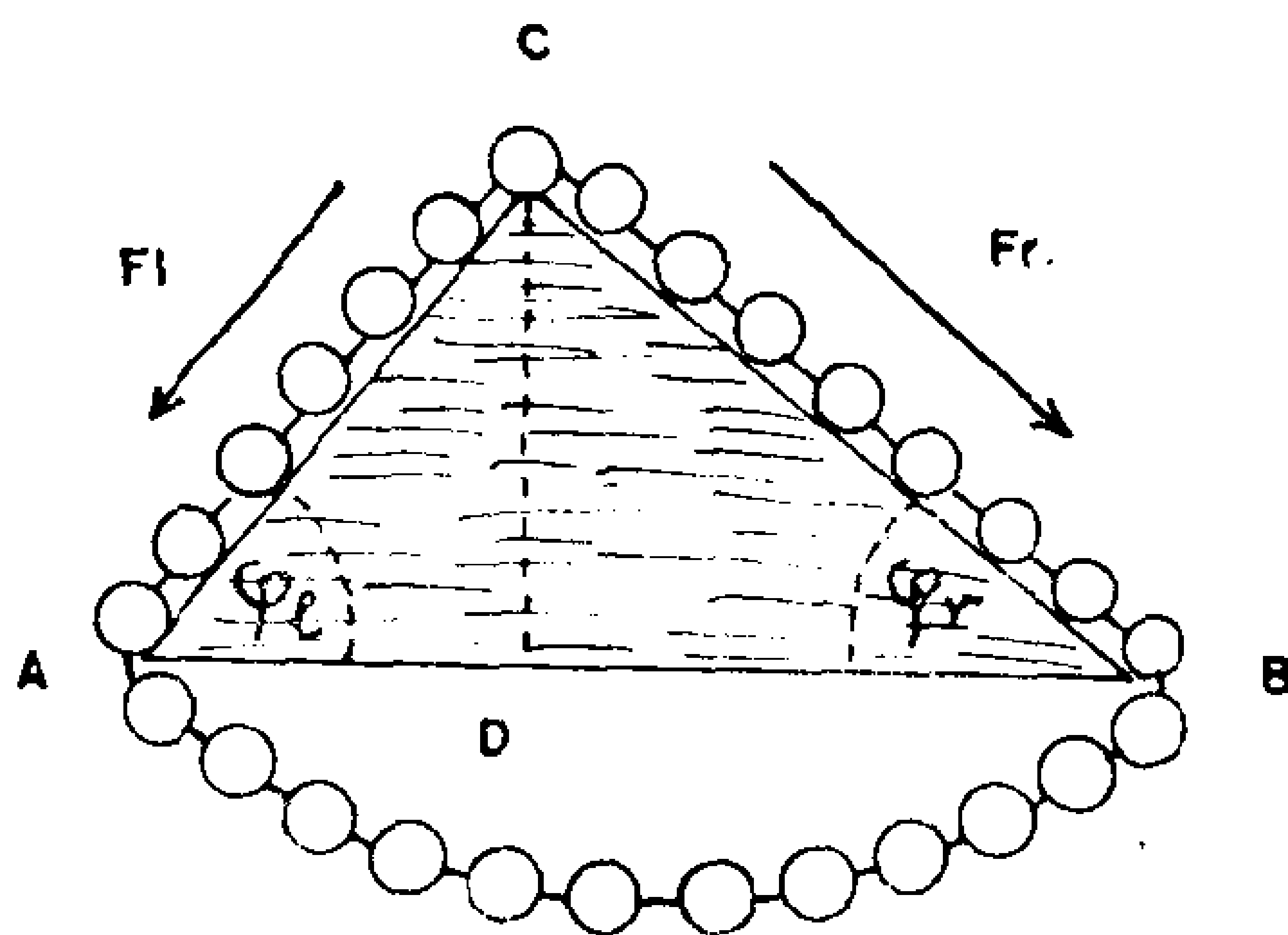


图 II-3　演示斜面上平衡定律的斯特文斯环状链

利用原子能”计划所能提供的高得多了。

但是，斯特文斯是一个重实际而又严肃认真的人，他否定了这种可能性，认为链子应处于平衡。但这就意味着斜面上一个球的拉力随着斜面与水平面之间夹角的减小而减小。的确，这是与放在水平面上的球不受力的作用这个事实完全一致的。因为左右两个斜面上的小球的数目明显地与这些斜面的长度成正比，所以若用 F_l 及 F_r 表示作用在每边单个小球上的力，我们就可写成

$$F_l \times \overline{AC} = F_r \times \overline{CB}$$

或

$$F_l / F_r = \overline{CB} / \overline{AC}$$

如引用角 φ_l 和 φ_r 的正弦来表征这两个斜面，则有

$$\sin\varphi_l = \overline{CD}/\overline{AC}; \quad \sin\varphi_r = \overline{CD}/\overline{CB}$$

所以上述关系可以改写成如下形式：

$$F_l / F_r = \sin\varphi_l / \sin\varphi_r$$

用文字来表达就是，放在斜面上的一个物体所受的沿斜面方向的重力与倾角的正弦成正比。

单　摆

当斯特文斯在其静力学研究中取得了很大进展时，在动力学（即研究物体运动的科学）上迈出第一步的荣誉落到了弗洛伦萨破落的贵族温森基奥·伽利累的儿子身上。尽管温森基奥先生自己对数学很有兴趣，但他计划让年轻的儿子伽利略从事一种更为有利可图的职业——行医。这样，在 1581 年，伽利略十七岁的时候就开始在比萨大学学医。但是，伽利略显然并不认为解剖尸体是一件很有意思的工作，他的永不疲倦的头脑正在寻找另一类的问题。

有一次，他去比萨大教堂做弥撒，心不在焉地看着被点蜡侍者弄动了的蜡架，蜡架摆动越来越小，最后慢慢停了下来。伽利略暗自问道，“每次摆动的时间是不是也越来越短呢？”伽利略没有停表——当时它还没有发明出来，于是他决定用数自己脉搏的方法来测量一次次摆动的时间。大概他自己颇为奇怪，他发现尽管每次摆动越来越小，但每次摆持续的时间却准确地相同。回家后，他用一块石头系在绳子的一端重复了这个实验，发现有同样的结果。他还发现，对于给定的绳长，不管他在实验中是用重石头还是用轻石头，振荡周期都保持相同。这样，现在大家都熟悉的所谓单摆装置就问世了。因为伽利略一面还在学医，所以他把其发现程序反了过来，建议用标准长度的单摆来量度病人的脉搏。这种仪器叫做“脉搏仪”，当时在医疗界变得很为流行，并且是现代白衣护士一面摸着病人的手一面看着自己的精巧的手表来数脉搏的先驱。但这也是伽利略对医学的最后一次贡献，因为对单摆和其它机械装置的研究完全改变了他的志趣。经过和父亲的一番争论之后，他改变了他的大学学习计划，开始研究数学和其它科学了。

他的兴趣多年都是集中在今天称之为动力学的方面，即研究运动的规律。为什么单摆的周期与“振幅”无关，即与摆动的大小无关？为什么重的石头和轻的石头系在同一绳子的一端时，是以相同的周期摆动呢？伽利略一直没有解决第一个问题，因为这需要微积分的知识，而它几乎在一个世纪之后才由牛顿发明出来。他也没有解决第二个问题，这个问题要等到爱因斯坦关于广义相对论的工作问世才能解决。但是，他对这两个问题的系统提出无疑是有很大贡献的，虽然对于它们的解答没有什么贡献！单摆的运动是重力引起下落的一个特例。如果我们放开一块石头，没有东西拴住它，它就会一直落到地上。但是，如果石头被系在一条绳子

上,绳子拴在天花板的勾子上,它就要被迫沿着一段圆弧下落。如果说不论轻的或重的石块拴在同一条绳子上时，到达最低位置所花的时间相同(单摆振荡周期的四分之一),那么,这两块石头在从同样的高度被放开后落到地上所花的时间也一定相同。这个结论与当时公认的亚里斯多德的哲学观点完全相抵触，后者认为重的东西比轻的东西下落得快。为了证明自己的观点，伽利略从比萨斜塔上落下了两个球,一个是木头的，一个是铁的,那些在下面不相信的观众看到了两个球在同一时刻打到地上。历史考证似乎表明这次演示从来没有真地做过，它只是一个生动的传说。伽利略在比萨教堂祈祷时发现了单摆定律的事也未必可靠。但是，他肯定将不同重量的物体下落过,也许是从他的房顶上落下;肯定也摆动过拴在绳子上的石头,或许是在他的后院里。

落体定律

当我们放开石头时,它向下运动得越来越快,伽利略希望知道这一加速运动遵从着什么数学定律。但是，因为自由落体运动得太快，没有现代化的设备例如快速照像机之类就无法对它进行详细研究。因此，伽利略决定“冲淡重力”，使一个球在斜面上滚动(图 II-4)。斜面越陡,球滚得越快,而在垂直面的极限的情况下,球就沿着该面自由落下。做这个实验的主要困难是测量球走过不同距离所需要的时间。伽利略解决的办法是用“水钟”，通过从一个大容器底部附近打开的小口流出的水量来测量时间。若记下球在相等的时间间隔内到达的位置,从起点开始,则他发现球在这些时间间隔内所走过的距离，彼此成 1:3:5:7 ……的比例。当斜面更陡时,相应的距离也变得更长,但它们的比例总是保持不变。因此,伽利略得出结论说,这个规律在自由下落的极限情况下也一定

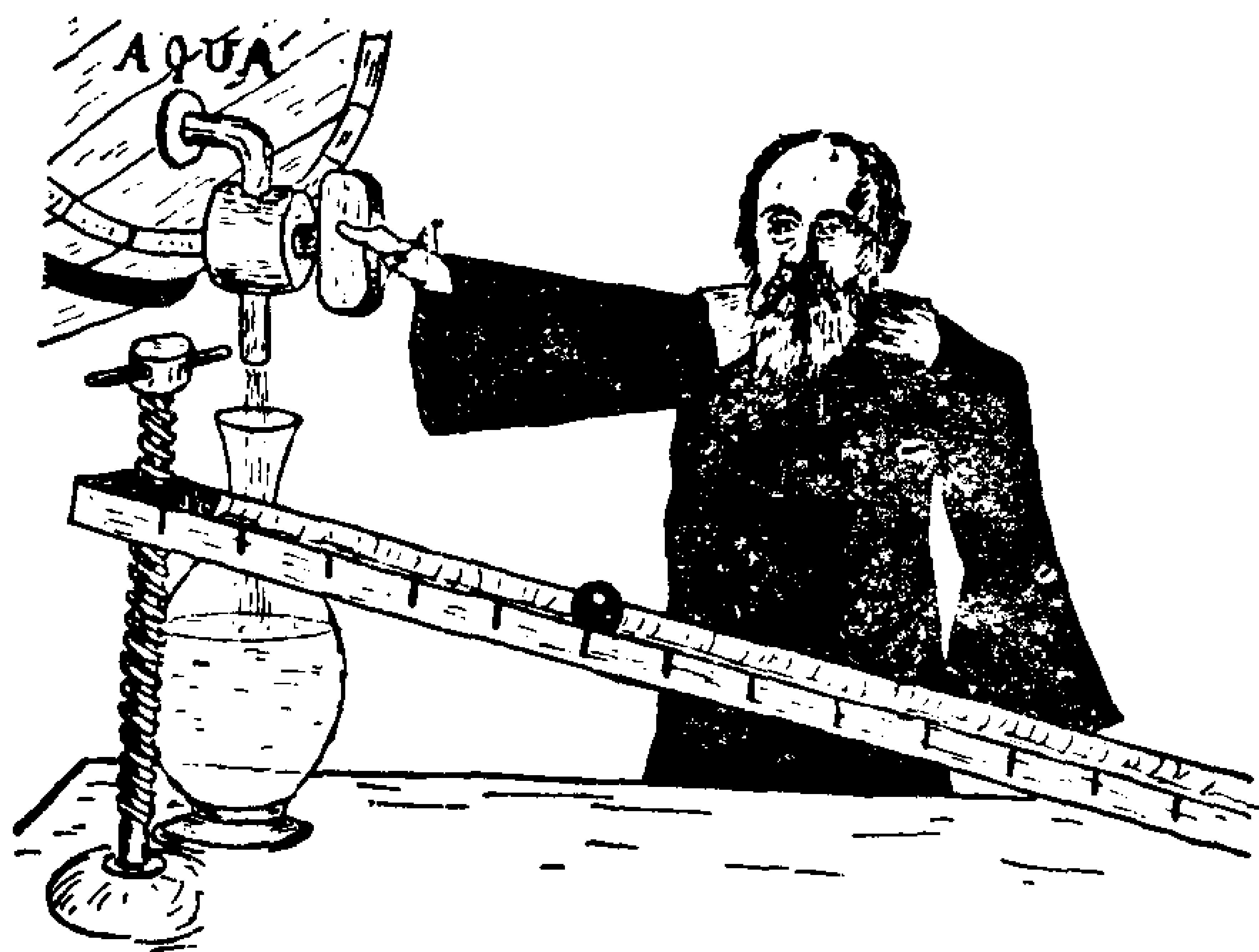


图 II-4 伽利略研究小球沿着斜面滚下的加速运动

成立。上面得到的结果可以用另一数学形式来表达，即在一定的时间内，小球所走的总距离与这段时间的平方成正比，或用伽利略时代的话来说，与时间成“倍比”。确实，如果我们把小球在第一段时间间隔内走过的距离取作单位长度，则在以后一系列时间间隔末所走过的总距离按平方律将是 1^2, 2^2, 3^2, 4^2……，或者是 1, 4, 9,16……。这样，相继的各段时间间隔内所走过的距离将是 1, $4-1=3$, $9-4=5$, $16-9=7$……*。

根据观察到的运动距离与时间的依赖关系，伽利略得出结论说，这一运动的速度一定是与时间成简单正比地增加的，让我们用伽利略本人的话来证明这个说法：**

“在加速运动中，速度是不断增大的，你不可能把连续增大的速度等级（用现代语言来说就是“速度的数值”）分为任何确定的数

* 根据代数，如果第几个时间间隔末走过的总距离是 n^2，则最后一个时间间隔内走过的距离是 $n^2-(n-1)^2=n^2-n^2+2n-1=2n-1$。

** 见 Galileo Galilei “*Dialogue on the Great World Systems*”. Chicago: Univ. Chicago Press, 1953. pp. 244—245.

目，因为速度每时每刻都在变化，这些数目总是无限多。所以，我们最好还是画一个三角形 ABC（图 II-5），以此为例来说明我们的想法。我们把 AC 边随意分成许多等份 AD，DE，EF，FG，GC，再过 D，E，F，G 做直线平行于底边 BC。现在让我们想象 AC 线上划分的各部分是相等的时间间隔，而过 D，E，F，G 点所作的平行线代表速度的等级，速度是增加的，并且在相等的时间内有相等程度的增加。设 A 点是静止状态，从这点开始，物体在 AD 时间内获得的速度等级是 DH，在第二段时间内，假定速度从 DH 增大到 EJ，依此类推，在以后的时间内对应于增大到线段 FK，GL 等等。

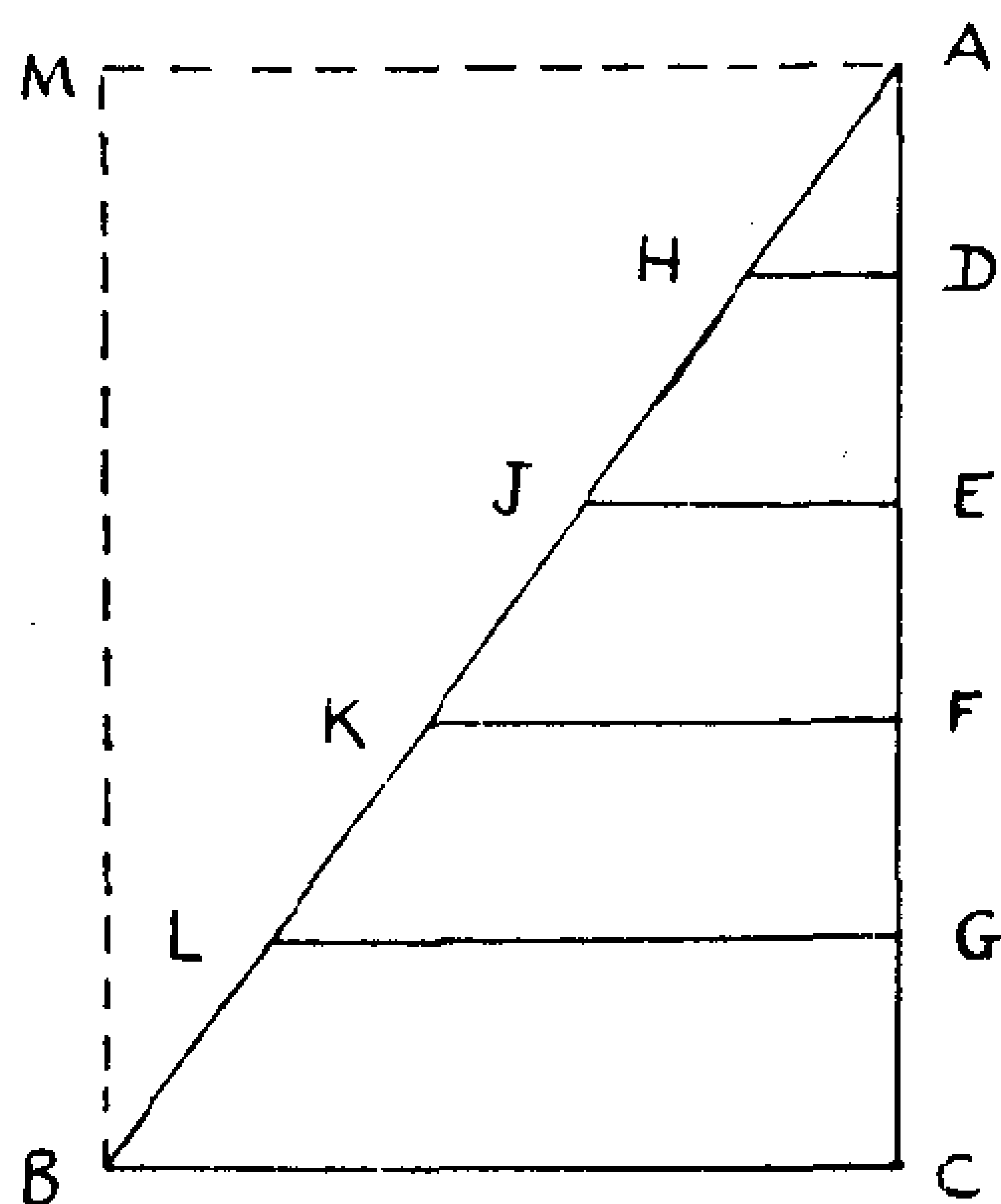


图 II-5 伽利略证明，在从静止开始的匀加速运动中，运动物体所走过的距离是它如果在整个时间内以不变的速度运动时所应走过距离的一半。

因为速度的增大每时每刻不断地进行，某一时刻与另一时刻不能分离，A 点可认为是最低的速度时刻，即静止状态。AD 是接着来的第一个时刻，所以，在时间 AD 获得速度等级 DH 之前，物体一定经过了无限多个逐步变大的速度等级，它们是在 AD 时间内的无限多个时刻获得的，相应于线段 AD 上的无限多个点。因此，为了表示在 DH 级之前有无限多个速度等级，我们必须想象无限多条不断变短的线段，假定它们都是过 DA 线上无限多个点作出的并平行于 DH，这无限多条线就代表着三角形 AHD 的面积。这样，我们就可以想象物体从静止开始并作匀加速运动时，它所通过的任何距离都要度过并利用无限多个速度等级，它们依照无限多

条线段而增大，这些线段都是从 A 点开始下移并假定平行于线段 HD 以至其余的 JE、KF 和 LG，而作出的运动一直可以继续到任意远。

现在让我们作出完整的矩形 $AMBC$，并把所有的平行线——不仅是三角形中已经作出的那些平行线，而且也包括假设从 AC 边上所有的点画出的无限多条其余的平行线——都延长到 BM 边；让 BC 是三角形中这无限多条平行线里最长的一条，它代表物体在加速运动中所获得的最大速度等级，这三角形的整个面积是物体在时间 AC 之内通过这一确定空间的所有速度的全体和总和；所以矩形就是同样多个速度等级，但每个等级都等于最大速度等级的全体的总和。这一速度的全体两倍于三角形中不断增大之速度的全体，正如这矩形两倍于三角形一样，所以，如果物体下落时采取的是不断增大的、对应于三角形 ABC 的速度等级，它在这段时间里通过了这一距离，那么，认为它以对应于矩形的均匀速度作匀速运动则在同一时间里将通过加速运动所通过的两倍距离，就是非常合理和非常可能的了。”

虽然这段话讲得冗长累赘，但我们应当记住，这是在 1632 年写的，而且是在 1661 年才译成英文的（托马斯·沙里斯伯里译）；上面这段话不仅是关于自由落体规律第一次系统的表述，而且也是所谓“积分学”发展的初步，在积分学中也是把无限多个无穷小量相加起来得出结果的。用现代的数学语言来说，伽利略关于匀加速运动的定律可以写成

$$\text{速度}=\text{加速度}\times\text{时间}$$

$$\text{距离}=\frac{1}{2}\times\text{加速度}\times\text{时间}^2。$$

对于自由落体，加速度常用字母 g 来表示（对重力），它等于

981 每秒每秒厘米 $\left(\frac{\text{厘米/秒}}{\text{秒}}=\frac{\text{厘米}}{\text{秒}^2}\right)$，意思就是物体开始下落后每秒内它的速度增加 981 厘米/秒。在英美单位制中，g 等于 32.2 英尺/秒^2。举例来说，飞机上投下的炸弹在 10 秒内达到的速度将是

$$981\times10=9810\ \text{厘米/秒}=98.1\ \text{米/秒}$$

或

$$32.2\times10=322\ \text{英尺/秒}$$

而下落的距离将是

$$\frac{1}{2}\times981\times10^2=49050\ \text{厘米}=0.49\ \text{千米}$$

或

$$\frac{1}{2}\times32.2\times10^2=1610\ \text{英尺}$$

伽利略对动力学问题的另一个重要贡献，是关于运动合成的观念，可以用下面的简单例子来说明:

假定我们举起一块石头，离地五英尺高，然后让它落下。根据上面给出的公式，石头将在 0.56 秒后落地，因为实际上有 $\frac{1}{2}\times32.2\times(0.56)^2=5$ 英尺。如果放开石头时，我们给予它比如说每秒 10 英尺的水平速度，那会发生什么事情呢？每个人根据日常经验都知道，在这种情况下石头将描出一曲线轨迹，并落在离我们脚下一定距离的地方。为了画出石头在此情况下的轨迹，我们必须认为石头参与了两个独立的运动：1）速度恒定的水平运动，这速度是我们在放手时给予它的；2）速度与时间成正比地增加的自由落体垂直运动。

这两个运动合成的结果如图 II-6 所示。在水平轴上，我们画一系列相等的间隔，表示石头在第一秒、第二秒……的时间内水平运动的距离。在垂直轴上，我们根据自由落体定律画一系列随

整数的平方而增长的距离。石头的实际位置用图中的小圆圈来表示，这些小圆圈落在一条所谓抛物线的曲线上。如果我们用两倍的速度扔出石头，它在水平方向的运动就要通过两倍大的距离，而在垂直方向的运动保持不变。结果，它将落在离我们脚下两倍远的地方，但在空中飞行的时间还是一样的。（在所有的考虑中，都略去了空气的摩擦，摩擦力将使扔出的石头的轨迹稍许变形。）

上述原理的一个有趣应用，是两个小孩玩的丛林战游戏的问题（图 II-7）。一个小孩站在树枝上，另一个用玩具枪瞄准他射击。假定放枪的孩子直接把枪指向树上的孩子，而在他扣动扳机的瞬间，树上的孩子离开树枝，开始落向地面。落下会不会免于挨打呢？回答是否定的，其原因如下。假如没有重力，子弹就会沿直线 ABC 打到孩子原来所站的地点。但由于重力，子弹在离开枪口时就开始下落，所以它参与了双重的运动：一是沿直线 ABC 的匀速运动，一是垂直方向的加速运动。因为所有的物体都以相同的加速度下落，所以子弹的垂直运动

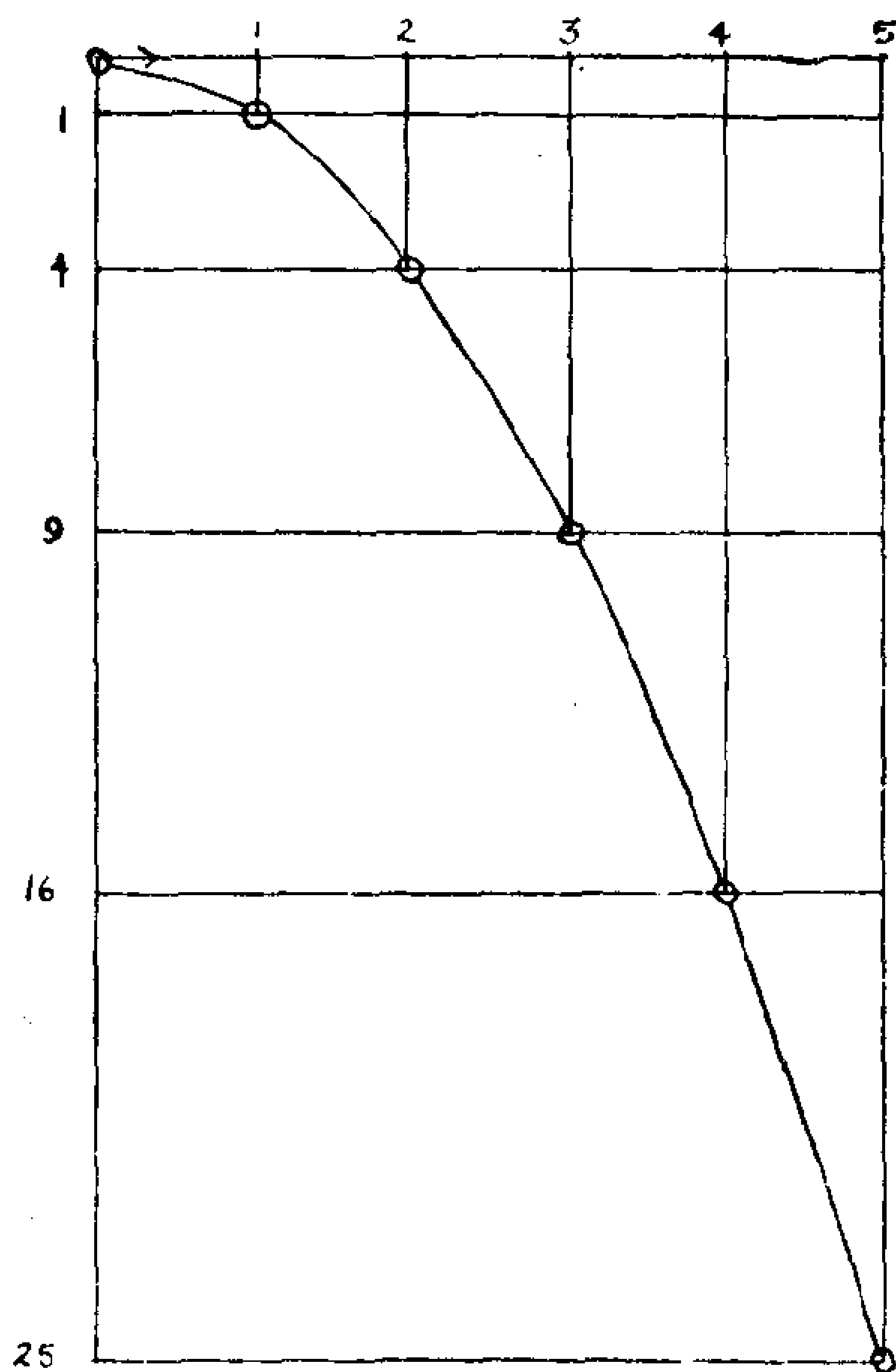


图 II-6　水平方向的匀速运动与垂直方向的加速运动的合成。得到的曲线是抛物线。

和小孩的垂直运动完全一样。这样，当子弹本来要到达离原来目标一半的路程 B 点时，它会下落一段距离 BB'，等于小孩在下落过程中所通过的距离 CC'。当子弹在无重力的情况下要到达 C 点时，它会下落一段距离 CB''（距离 BB' 的四倍），正好等于小孩落下的距离 CC''。所以这个小孩还是要被结结实实地打中鼻子。

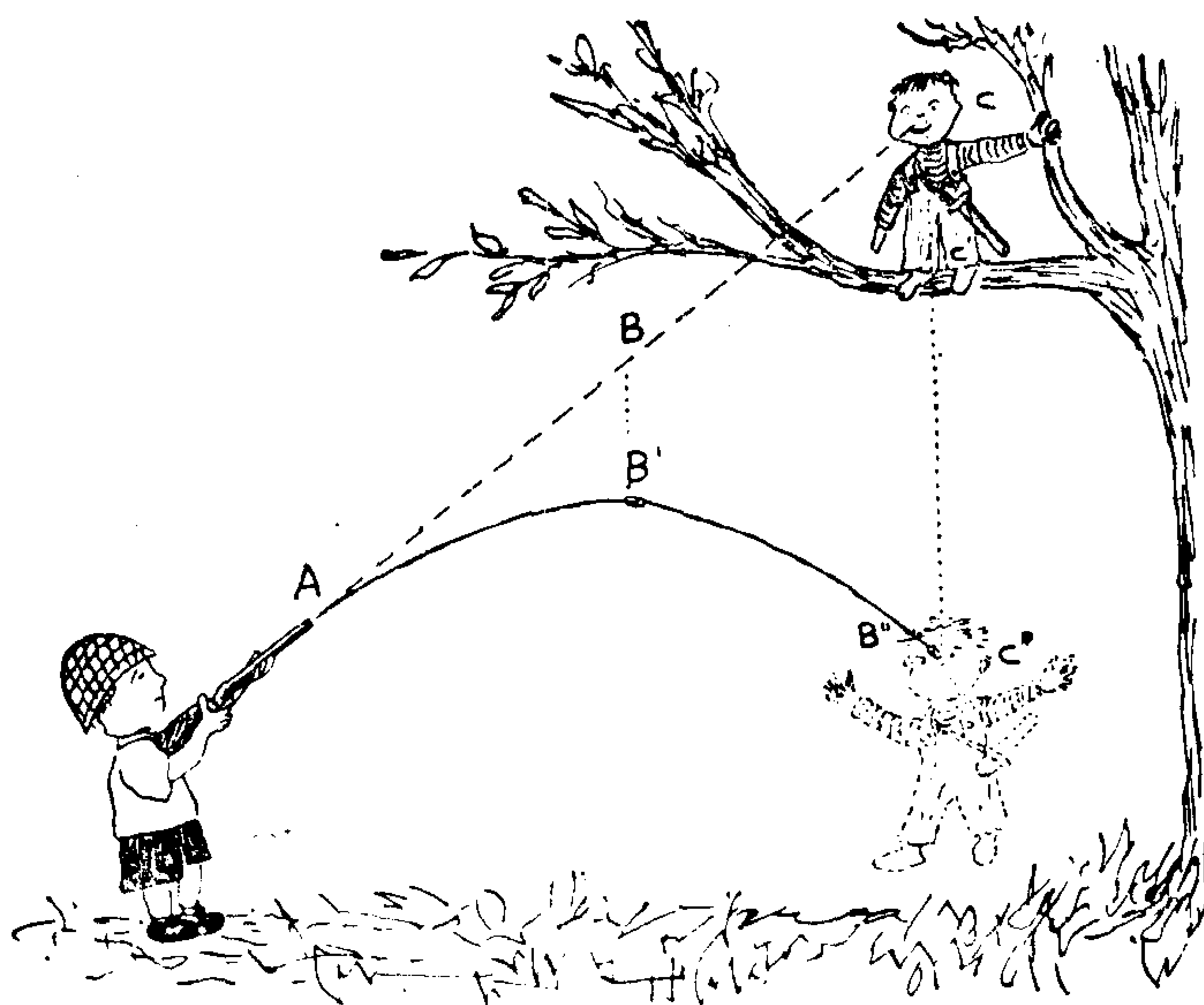


图 II-7　因为所有的物体都以相同的加速度下落，如果一个玩丛林战游戏的小孩直接把枪瞄准树枝上的"敌人"射出"子弹"，只要树上的小孩在射击的瞬间跳下来，子弹就会正好击中他的鼻子。

我们可以从一运动车船上扔下物体来代替上述的扔石头或射子弹。假定我们从一艘快速运动的轮船（或伽利略时代划桨的帆船）的桅杆顶上投下一块石头。当放手的瞬间石头也具有与船一样的水平速度，所以放手之后它还会继续以这一水平速度运动，直到它落在桅杆基部之前，它都保持这个水平速度。石头运动的垂

直部分是加速的自由落体运动，所以它将正好打在桅杆基部的甲板上。如果我们在运动列车的车箱里或飞机的机舱里扔下物体，当然也会有同样的结果，而不论它们运动的速度多快。

所有这一切在我们现在看来都十分简单明了，但在伽利略生活的时代就不是这样了。那时大家都相信统治着当时科学思想的亚里斯多德的教导，认为物体只有在受到推力时才运动，推力一旦消失，运动就要停止。根据这种观点，在桅杆顶上投下的石头会垂直掉下来，而船在继续前进，这样，石头就会掉在船尾附近的甲板上。中世纪经院哲学的特点，就是对这类问题翻来复去讨论不休，可就没有人愿意爬到行船的桅杆上扔一块石头看看！

下面一段摘自伽利略的《关于伟大世界体系的对话》一书中的文字，是对这种情况的一个生动说明，该书于1632年在弗洛伦萨发表。按照古希腊作者的传统，伽利略用三个从奇特城市威尼斯来的人物之间的对话写成了这本书：赛尔维特斯代表作者自己说话，塞格瑞德斯是一位聪明的外行，而西蒙玻力修斯则是一位亚里斯多德学派的不甚高明的代表。下面就是他们关于从行船桅杆顶上落下的石头或从竖立在运动着的地球（根据哥白尼学说）上的塔顶上落下的石头问题进行的争论节录：

“赛：亚里斯多德说，看看向上抛出或射出的物体沿着原路线垂直地回到它们所由射出或射出的同一地点，那就是地球不动的最令人信服的论据。尽管运动达到很大的高度，这一点仍然是对的。所以，这里就可以引用大炮直接向上发射的事例作为论据，它也与亚里斯多德和托勒密所用的别的论据一样，即我们看到从高处落下的重物体是沿着笔直的垂直路线降回地面的。现在我可以着手解开这些疑团了。请问你，西蒙玻力修斯，要是有人想否定托勒密和亚里斯多德，否认从高处自由下落的物体是沿着笔直的垂直路线下降，即否认直接降到地心，他会用什么办法来证明这点呢？

西：通过感觉，我们确信塔或其它高处是笔直的垂直地面的，感觉向我们

表明，石头是沿着墙壁丝毫不差地笔直落下来的，并停在我们让它下落的地点正下方。

赛：但是，要是地球碰巧在转动，当然它也带着一起转动，那时石头也是贴着塔壁滑下去，它的运动又必定是怎样的呢？

西：这时我们当然可以描述它的运动，它既会有那个从塔顶降落到塔底的运动，同时又应当有跟着这个塔一起的运动。

赛：这样，它的运动就应当由两部分组成；由此可见，石头所描出的轨迹不再会是那条简单的垂直线，而是一条横线，也许它不直了。

西：我没法说它不直，但有一点我是知道得很清楚的：它一定会是横线。

赛：所以你看，仅仅靠观察石头沿着塔身下落，你是不能确实肯定它所描出的轨迹是一笔直的垂直线的，除非你首先假定地球静止不动。

西：对呀！因为要是地球运动的话，石头的运动就会是横向的而不是垂直的了。

赛：然而，亚里斯多德的答辩在于他认为，石头要同时参与直线和圆周混合起来的运动是不可能的，至少照他看来是不可能的。因为，如果他不坚持认为石头不可能同时既向地心运动又绕地心转动，他就会懂得，无论塔运动也好，静止不动也好，石头在下降时都是有可能擦着塔壁下落的。因此他应当了解，从擦着塔壁下落这个现象是推断不出什么地球是动还是不动的结论的。但是，没有什么办法替亚里斯多德辩解这一点；因为如果他具有这样的观点，又是他的论据中很实质性的部分，他就应当把它表达出来。还因为，我们不能说这样一种结果是不可能的，也不能说亚里斯多德认为它是不可能的。第一点不能肯定，因为我不久将说明，它不仅是可能的，而且是必须的。第二点也不能断定，因为亚里斯多德自己承认火当然是沿直线运动的，同时又随着周日运动一起转动，这是上天赋予全部火元素和大部分上层空气的一种运动。因此，如果他认为向上的直线运动与月球凹面传给火和空气的圆周运动能够混合的话，他就更应当解释，石头向下的直线运动为什么不可能与圆周运动混合了，因为我们预先假定圆周运动是自然赋予整个地球的，而石头是它的一部分。"

后来，赛尔维特斯在"对话"中提出了一个很有趣的实验，专门用来证明他在上面讨论中所表达的观点：

"赛：如果我没有搞错，同其它事例比较起来，你对此更为疑惑不解是因为你看到鸟儿是有生命的，它们能够用自己的气力随意反抗地上物体本来就有的原始运动。例如，我们看到它们向上飞，这对重的物体说来该是完全不可能的事；而当它们死了时，就只能向下落。所以你就认为，对上面说的各种投射物都成立的理由，对鸟儿不能成立。这确实是很对的，正因为它对，所以我们看到活鸟的情况与落体不同。如果你从塔顶上同时让一只死鸟和一只活鸟落下，死鸟的情况将与石块一样，即首先要跟随普遍存在的周日运动，同时又要象石头那样作降落运动。但是如果让活鸟落下，什么东西能妨碍它(它始终都要作周日运动)不靠自己的翅膀想飞多高就飞多高呢？而鸟儿所特有的这种新的运动，我们并没有参与进去，所以对我们来说必定是可以明显看得出的。简单地说，鸟儿飞的结果和我们向世界任何地点抛射物体不同的地方，无非只在于抛射体是靠外界的投射人来运动，而鸟儿是靠内部的因素运动。

为了最终证明上面引述的这全部实验毫无价值，我以为现在是要明确指出如何严格验证这一切的方便的时候了。设想把你和你的朋友关在一只大船的舱板下最大的房间里，里面招来一些蚊子、苍蝇以及诸如此类有翅膀的小动物。再拿一只盛满水的大桶，里面放一些鱼；再把一只瓶子挂起来，让它可以一滴一滴地把水滴出来，滴入下面放着的另一只窄颈瓶子中。于是，船在静止不动时，我们看到这些有翅膀的小动物如何以同样的速度飞向房间各处；看到鱼如何毫无差别地向各个方向游动；又看到滴水如何全部落到下面所放的瓶子中。而当你把什么东西扔向你的朋友时，只要他和你的距离保持一定，你向某个方向扔时不必比向另一个方向要用更大的力。如果你在跳远，你向各个方向会跳得同样远。尽管看到这一切细节，但是没有人怀疑，如果船上情况不变，当船以任意速度运动时这一切应当照样发生。只要这运动是均匀的，不在任何方向发生摇摆，你不能辨别得出上述这一切结果有丝毫变化，也不能靠其中任何一个结果来推断船是在运动还是静止不动。这种等价关系产生的原因是，船的运动是船中一切事物也包括空气在内所共有的；我的意思是假定这些事物都被关在房间里，但是，如果这些东西是处在甲板上敞开的空气里，不一定完全随船一起运动，则在上述某些结果中，就会看到多少可以觉察的差别了。毫无疑问，烟会象空气一样落在船的后面，如果苍

蝇和蚊子与船相隔一段距离，它们也会受空气的阻碍，而不能随船一起运动；但如就在附近，则因为船本身乃是一种弯曲的结构，会带着靠它最近的部分空气一起走，苍蝇和蚊子就会毫不费力地、毫无困难地跟着船一起运动了。由于同样原因，在骑马送信时，我们有时看到讨厌的马虻跟着马在身边飞来飞去。但在往下滴水时，会有极小的差别，在跳跃或投射重物时，差别就完全觉察不到了。

塞格瑞德斯：虽然我在航海时从来没有想过要试验这些现象，可我相信它们会象你说的那样发生。为了证实这一点，我想起了我在船舱里经常不知道船究竟是在动还是静止不动；有时我猜想船是朝某个方向行驶，其实它朝另一个方向走。所以我承认并确信前面提出的所有证明相反说法的实验都毫无价值。

现在还剩下一种意见，其根据是，经验向我们表明快速的转动有能力把附着在一个转动机械上的物质挤走，使他们散开。许多人都以这个事实为根据，其中也包括托勒密，认为地球要是以这样大的速度转动的话，它上面的石头和动物就要被抛到天空中去了，也不能有一种强力的灰浆，足以把建筑物固定在它们的基础上，使它们免遭同样的命运了……”

在封闭的船舱中做任何力学实验都不可能发现一只船是停泊在港口还是行驶在海上，这个说法现在称之为“伽利略相对性原理”。在此后的物理学发展中，几乎花了三个世纪的时间，这个原理才由爱因斯坦推广到在一个作匀速运动的封闭中观察光学和电磁现象的情况。伽利略对力学的贡献就是这么些了。

作为天文学家的伽利略

伽利略不仅是最早的实验物理学家和理论物理学家之一，他还对天文学做出了巨大的贡献，给人类开辟了我们周围宇宙的无限远景。伽利略的注意力首次转向天空是在1604年，那一年有一颗新的明亮的星（今天我们称之为“新星”）在一天夜晚忽然出现在几千年来占星家们都认为是一成不变的星座之间。当时伽利略四

十岁，他证实了这颗新的星真正是一颗恒星，而不是地球大气中的某种大气现象，并预言它会渐渐消失。根据亚里斯多德的哲学和教会的教义，天空是绝对一成不变的，而证实一颗新的星在天空出现，这就使得伽利略在他的科学同事和高级牧师中树敌不少。伽利略在研究天空方面迈出了这第一步后仅仅几年，他就造出了第一架天文望远镜，从而对天文学进行了一场革命，他是这样来描述天文望远镜的：

"大约十个月前，我们听到传闻说，一位荷兰人精心制造了一部光学仪器，借助于它，可见的物体尽管离观察者的眼睛很远，看起来也和近在眼前那样清楚。关于这个奇迹的一些故事已经到处流传，有人相信，也有人怀疑。几天后，一位尊敬的法国人巴道维尔从巴黎给我来了一封信，使我坚信确有其事，这终于成了我要全力去研究其理论，并发现用什么方法可以使我也发明一部同样仪器的原因。考虑了折射理论以后，我很快就达到了目的。我先准备好一只铅管，在其两端安装两块玻璃透镜，两块透镜都有一面是平面，至于另一面有一块是凹的，另一块是凸的。"

造出仪器后，伽利略就把它指向天空，神秘的宇宙便展现在他的眼前。他考察了月亮并发现：

月亮的表面不完全是光滑的，既不平坦也不是完全球形的，不象许多学派的哲学家对月亮和其它天体所设想的那样，正相反，它充满了凸凹不平，满是窟窿和隆地的疙瘩，就象地球本身一样，到处布满了高山深谷。

他观察了行星，并发现：

行星看来完全呈圆形，就象用圆规画出来的一样，它们好象是许多小月亮，完全明亮并呈现为球形，但是恒星用肉眼（这一定是第一次使用这个名词：）看起来不象有一个圆形的周边，而是更象一团火，它们向各个方向射出光线，非常明亮，用望远镜观察时，形状完全和直接用肉眼观察它们一样。

1601年一月七日他观察了木星，并写道：

在这个行星周围有三颗小星，虽小但很明亮；尽管我相信它们是属于恒星一类的，但是使我觉得有些奇怪的是，它们似乎恰好是排列在一条平行于黄道的直线上，比其余那些同它们一样大的星都亮……。东方有两颗星，西方有一颗……，但是，仿佛命中注定似的，我在一月八日又观察这部分天空时，发现了很不相同的景象：这次是三颗小星全在木星的西边，而且比前一夜晚上彼此靠得更近了。

于是伽利略得出结论说，

天空中有三颗星在木星周围运动，正象金星和水星绕着太阳运动一样。

他观察了金星和水星，发现它们有时也象月亮一样呈半钩状，由此他得出结论，

金星和水星绕着太阳旋转，也和其它所有的行星一样。过去，毕达格拉斯学派、哥白尼和开普勒都确信这是真理，但是从来没有象我们现在对金星和水星那样通过自己的感官得到证实。

伽利略观察了银河，并发现它

……无非是无数恒星聚集在一起所形成的星团。

伽利略用望远镜取得的这些发现，对哥白尼世界体系的正确性给予了无可辩驳的证明，他喜悦地到处去宣传它。但是，这自然是宗教裁判所所不能容许的，他终于被逮捕了，并遭到长期的单独监禁和审讯，但这一切似乎都没有改变他的战斗精神；1633 年 1 月 15 日，在最后一次审判的前几个月，伽利略给他的朋友荻奥代蒂写信说：

当我问是谁创造了太阳、月亮、地球和群星，谁创造了它们的运动和这样布置时，我也许会被告知，这是上帝的创造。当我继续问圣经是谁的创造时，我肯定被告知它是圣灵，即也是上帝的创造。如果现在我问圣灵是否是用一些显然违背真理的话来满足一般未受教育的民众的求知欲，我相信人们将从所有的神圣著作中引经据典地告诉我，这实在乃是圣经的习惯，圣经的千百段文字的内容其实只是异端和亵渎，因为上帝在其中表现得好象是一个充满

了仇恨、罪恶和健忘的人。倘若现在我问：上帝是否象民众所理解的那样曾经改变过他所创造出来的事物，或者不然的话，天地万物是否按照人们的意愿那样一成不变和难以洞悉，永远保持宇宙的同一种运动、同一种形状和同一种划分呢？我肯定会被告知，月亮总是一个圆形，虽然长期以来它被认为是扁平的。总而言之，谁都不会坚持造物主为了适合人的口胃曾经改变过它所创造出来的事物。倘若情况真的如此，我就要问：为了理解世界的各部分，何以一定要从研究圣经开始，而不能从研究上帝所创造出来的事物开始？它所创造的事物是否就应当不如它的话那样受尊重？如果有人认为，说地球在运动便是异端，而后来实验和证据都向我们表明情况确实如此，教会怎么不会遇到很大困难呢！相反，如果事物和圣经一旦不相吻合，我们就要认为圣经是第二位的，这对它并无妨害，因为它经常被修改来迎合民众，常常把虚妄的东西归之于上帝。所以我一定要问，何以我们一谈起太阳或地球时，就坚持认为圣经是绝对不会有错的呢？

1633 年 6 月 22 日，伽利略 69 岁时，被带到了教会的宗教法庭的法官面前，他跪着做了如下的“招供”：

“我，伽利累·伽利略，弗洛伦萨人温森基奥·伽利略的儿子，七十岁*。我个人被带来受审，跪在您、最杰出最尊敬的红衣主教和全世界基督教国家反对异端堕落的宗教法庭庭长面前，面对着福音书，用我自己的手按着它宣誓：我一直相信，并且在上帝的帮助下将来也相信罗马天主教圣公会所主张、训导和传布的每一条教义。总之，因为我已接受宗教法庭的命令，完全放弃我认为太阳是中心并且不动这一虚妄的观点，决不以任何方式坚持、辩解和教授上述荒诞无稽的学说……我希望从您阁下和每个天主教徒的头脑中，消除对我当然抱有的强烈怀疑。因此，我以一颗真诚的心和诚实的信用，发誓公开放弃、诅咒并嫌恶上述的谬见和异端邪说，乃至其它一切反对教会的异端邪说；我还发誓，将来无论在口头上或文字上决不说也决不主张任何可能对我产生类似怀疑的话；此外，

* 这是伽利略供词的原文。当时他的年龄实际是六十九岁四个月零七天。

如果我知道任何人是异教徒或怀疑任何人是异教徒的话，我一定向宗教法庭或向当地宗教法庭法官和大主教检举告发。而且我发誓并保证，我一定履行并完全遵守宗教法庭现在或将来加诸于我的全部赎罪苦行。我对我上述保证、誓言和声明若有丝毫违背(天亦厌之！)，我甘受神圣的法典和其它针对这种罪过的一般法令与专门法令对我判决宣布的刑罚惩处。我的的确确按着我手中的福音书发誓，我，上面报过姓名的伽利略，已经象上面所说的那样公开弃绝邪恶，并保证约束自己，作为其证据，这是我亲手在这份誓绝书上签名画押，我当众逐字逐句地宣读了它。"

有一个故事说，伽利略在"招供状"后马上大声喊道："Eppur si muove！"(无论如何，它(地球)仍在运动！)，但这不是事实，它不过说明过去传说的一个趣闻更有可能罢了，据说当时伽利略正注视着一条误入宗教法庭的可爱的小狗在不停摇动尾巴。伽利略公开承认了自己的异端罪行之后，就被禁闭在弗洛伦萨附近的阿西曲别墅中，我们现在会称之为"软禁"。1642年1月8日，双目失明而又厌倦了生活的伽利略死去了。

第三章　上帝说："让牛顿去吧！"*

伽利略在弗洛伦萨于隔离中死去的那一年，一个名叫艾萨克的早产婴儿诞生在林肯郡的一个姓牛顿的农民家庭里。艾萨克早年在学校中并没有表现出任何将来要成为伟人的迹象。他是一个多病而又腼腆的孩子，学习上也很落后。使他脱离这种状况的原因是和一个同学打架，这个同学是班上最好的学生之一，常常欺负其它的孩子。牛顿因为肚子上被这个小霸王(他的姓名已失传了)踢了一脚，便决定跟他干一仗，由于(牛顿)具有"过人的意志和刚毅精神"，结果把那个家伙揍了一顿。他在体力上赢得了一次胜仗后，决心要在智力搏斗中取得全面胜利，经过艰苦努力，他终于成为班上第一名好学生。接着，他又打胜了另一仗，说服了想让他务农的母亲，在18岁的时候进入了剑桥的三一学院，专门研究数学。1665年，牛顿取得了学士学位，并没有什么特别优秀之处。

时疫期间的进步

1665年仲夏，大规模的时疫在伦敦流行，几个月中间伦敦人十死其一。剑桥大学因为接近疫病流行的中心，于当年秋季关闭，所有的学生都回家去了。这样，牛顿就回到林肯郡父母家中，在家里呆了十八个月，直到大学重新开学。

在乡下居住的这十八个月是他一生中最有收获的时期，可以

---

* 引自亚历山大·波普的诗(1688—1744)："自然界和自然界的定律隐藏在黑暗中；上帝说：'让牛顿去吧！'，于是一切成为光明。"

说他在这段时期实际上孕育了使全世界都感激他的全部思想。

引用牛顿自己的话说，

√1665年初，我发现了……把任意指数(幂次)的二项式化简为级数的法则。*同年五月我发现了正切方法。……十一月发现了直接流数法(即现在称之为微分学的原理)，次年一月发现了色彩理论，接着，五月着手研究流数法的逆运算(即积分学)。同一年，我开始考虑如何把重力推广到月球轨道……以及将维持月球在其轨道上运动所需的力与地球表面上的重力加以比较。

牛顿以后的科学生涯，专门致力于发展他在林肯郡所孕育的思想。

26岁时，他被任命为剑桥大学的教授，30岁时被选为皇家学会的会员，这是英格兰最高的科学荣誉。据他的传记作者说，牛顿是一个呆心教授的典型。他“从不作任何娱乐和消遣，他不骑马外出换换空气，不散步，不玩球，也不做其它任何运动，认为不花在研究上的时间都是损失。”他常常工作到半夜三更，往往忘记吃饭，当他偶尔在学院的餐厅出现时，常常“穿一双磨掉了后跟的鞋，袜子乱糟糟，披着衣裳，头也几乎不梳。”他总是专心致志地思考，对日常生活的每个问题都非常天真幼稚，不切实际。有个故事说，他曾在家里的房门上开了一个洞，给他的猫出入用。当猫下了小猫崽后，他又在大洞旁边添上几个小洞，给每个小猫各用一个。

牛顿的个人生活并不是很愉快的，经常卷入与同事的争论中，也许这是早年与同学打架的反映。他曾与剑桥的另一位物理学家罗伯特·胡克(弹性定律的发现者)发生过激烈的争论，争吵的内容涉及到他的色彩理论以及谁先发现了万有引力定律的问题。还有其它的争居先权的问题，例如为了微积分的发明权与德国数学家莱布尼兹争吵，为了光的理论与荷兰人惠更斯争吵。天文学家

* 就是现在中学代数中教的所谓牛顿二项式定理。

约翰·富莱姆斯梯差不多不和牛顿讲话，说他是一个"阴险的、野心勃勃的、极其贪婪的沽名钓誉者，根本不能容纳不同意见，……归根到底是个好人，但生性多疑。"

在剑桥工作的期间，牛顿一直致于发展他在23—25岁时就已孕育出来的光辉思想，但其大部分发现都秘而不宣。这就说明了为什么他的全部成果都发表在他一生的后半期：力的工作在44岁发表，而光学方面的工作是在65岁时发表的。

牛顿的"原理"一书

在他所著《自然哲学的数学原理》* 一书的序言(所记日期是1686年5月8日)中，牛顿写道：

古人十分重视力学，认为力学这门科学在研究自然事物时具有极其重要的作用，而今人则舍弃具体的形状和隐蔽的性质，力图以数学定律说明自然现象，所以我在这本论著中也致力于用数学来探讨(自然)哲学的问题。古人认为力学有两方面，一是推理的力学，即通过论证严密发展起来的力学，另一方面是实用力学。所有的人工技艺(工程学)都属于实用力学，力学就是因此而得名的。但是，工匠的工作不是完全精确的，这就使得力学与几何学很不相同：完全精确的科学称为几何学；而不太精确的称为力学。但是，过错不在技艺本身，而在工匠。不精确地工作的工匠算不上真正的工匠；谁要是完全精确地工作，他才会是世上最完善的工匠……

我考虑的是(自然)哲学，而不是技艺，写的不是人的力量，而是自然界的力量，即主要是考虑那些与重力、轻率(浮力)、弹力、液体的阻力以及其它类似的力有关的事物，而不论它们是吸力或推力；因此，我把这部著作叫作(自然)哲学的数学原理，哲学的全部重任似乎就是：从运动的现象来研究自然界的力，然后再从这些力去论证其它的现象……

我希望我们能把……自然现象……从力学原理中推导出来。因为有许多理由使我猜想它们全部可能与某种力有关，正是这些力使得物体中的粒子

---

* 当时"自然哲学"的含意就是关于自然定律的研究。

由于某些至今尚未知道的原因或者互相推进，结合成有规则的形状，或者互相推斥，彼此远离。正因为这些力都是未知的，所以哲学家一直试图探索自然而都以失败告终，我希望这里所建立的原理能给这方面或给（自然）哲学的比较正确的方法带来一定光明。

在上述著作中，牛顿给所有的物理现象奠定了一个所谓力学解释的纲领，他的观点直到本世纪初都在物理学中占统治地位，仅仅在相对论和量子论的冲击之下才被压倒。他系统表述了他的纲领，用十分清晰而严密的语言发展了力学现象的数学处理方法，以致今天在任何一本论述经典力学的教科书中，还可以照样应用它们。这里我们引录牛顿原著的开头几段，只加了少数说明（放在括号中），来阐明十七世纪的科学术语在现代的含义。

定义

定义 I：物质的量（质量）是物质多寡之量度，由其密度和尺寸（体积）共同度量。

因此，两倍密度的空气，在两倍空间（体积）中，其量为四倍，在三倍空间（体积）中其量为六倍。对于因压缩或溶化而凝聚起来的雪、细小的尘埃或粉末，以及不管由于什么原因而不同程度地凝聚起来的所有物体，都同样可以这样说……（用现代的语言来说就是，任何给定物体的质量，等于其密度与其体积的乘积。）

定义 II：运动的量是运动多寡之量度，由速度和物质的量共同度量。（用现代的话说就是，运动的量——现在常称为"机械动量"或简称"动量"——是运动物体的质量与速度之乘积。）

整个物体的运动是其所有部分的运动总和；所以，对于一个其量为两倍（质量为两倍）的物体，具有相同速度时，运动（机械动量）是两倍；具有两倍的速度时，运动为四倍。

定义 III：物质的惰性力或固有之力，是一种反抗的能力，由于这种力，任何物体不论是静止的或是沿笔直的线（直线）均匀向前运动的，都要尽力维持其现状。

这种力总是与具有该力的物体（的质量）成正比，而与物质的惰性毫无区

别，只是说法不同而已。由于物质的惰性，物体要脱离其静止状态或运动状态是困难的，基于这种考虑，这种表示惰性的力可以用另一个最确切的名称，叫作惯性力或者惰性力……

定义IV：外力是加于物体上的一种作用，以改变其运动状态，而不论这种状态是静止的还是沿着笔直的(直)线匀速运动的。

外力只存在于作用的过程中，作用一旦过去，它就不复存在。仅仅由于惰性，一个物体才可以保持它所获得的新的(运动)状态。但外力的来源可以不同，例如可来自碰撞、压力或向心力等。

在定义了质量、动量、惯性和力的概念之后，牛顿便开始系统表述基本的运动定律了：

定律I：每个物体都要继续保持它的静止状态或沿着笔直的(直)线作匀速运动的状态，除非对它施加外力以迫使它改变这种状态。(图III-1 a)

在没有空气阻力妨碍或重力向下吸引的情况下，抛射体将继续其运动。一个陀螺的各部分由于内聚力的作用而不断离开其各自的直线运动，如果没有空气阻力，它就不会停止转动。象行星和彗星这样较大的物体，由于在较为自由的空间中遇到的阻力较小，所以它们能在更长的时间内同时保持其进动和圆周运动。

定律II：运动(即机械动量)的变化与外加推动力成正比；并发生在该力的作用线方向上。(图III-1b)

如果一个力产生一运动，则两倍的力产生两倍的运动，三倍的力就产生三倍的运动，而不论这个力是一下子加上去的，还是相继地逐渐加上去的。如果物体起先是运动的，那么，上述运动(其指向总是与产生这运动的力指向相同)就要加到先前的运动上或从其中减去，这要看它们彼此是同向还是反向的；如果它们的方向彼此倾斜时，就要倾斜地连合起来，而产生一个由两个方向共同决定的新运动。

牛顿的第二定律还可以有一种稍许不同的表述方法。既然运动的量是运动物体的质量与其速度的乘积，则运动的变化率就是质量与速度变化率即加速度的乘积。由此可以得出结论；受一定的力作用的物体的加速度与这个力成正比，而与这物体的质量成

反比。根据这个定律，我们可以引进力的单位，把它定义为这样一个力：它作用在一克质量的物体上可以使其获得每秒每秒一厘米的加速度。力的这个单位叫作达因，它比较小，差不多是一只蚂蚁所能负担的力。工程上常用的单位比它大 10^5 倍，叫作牛顿。

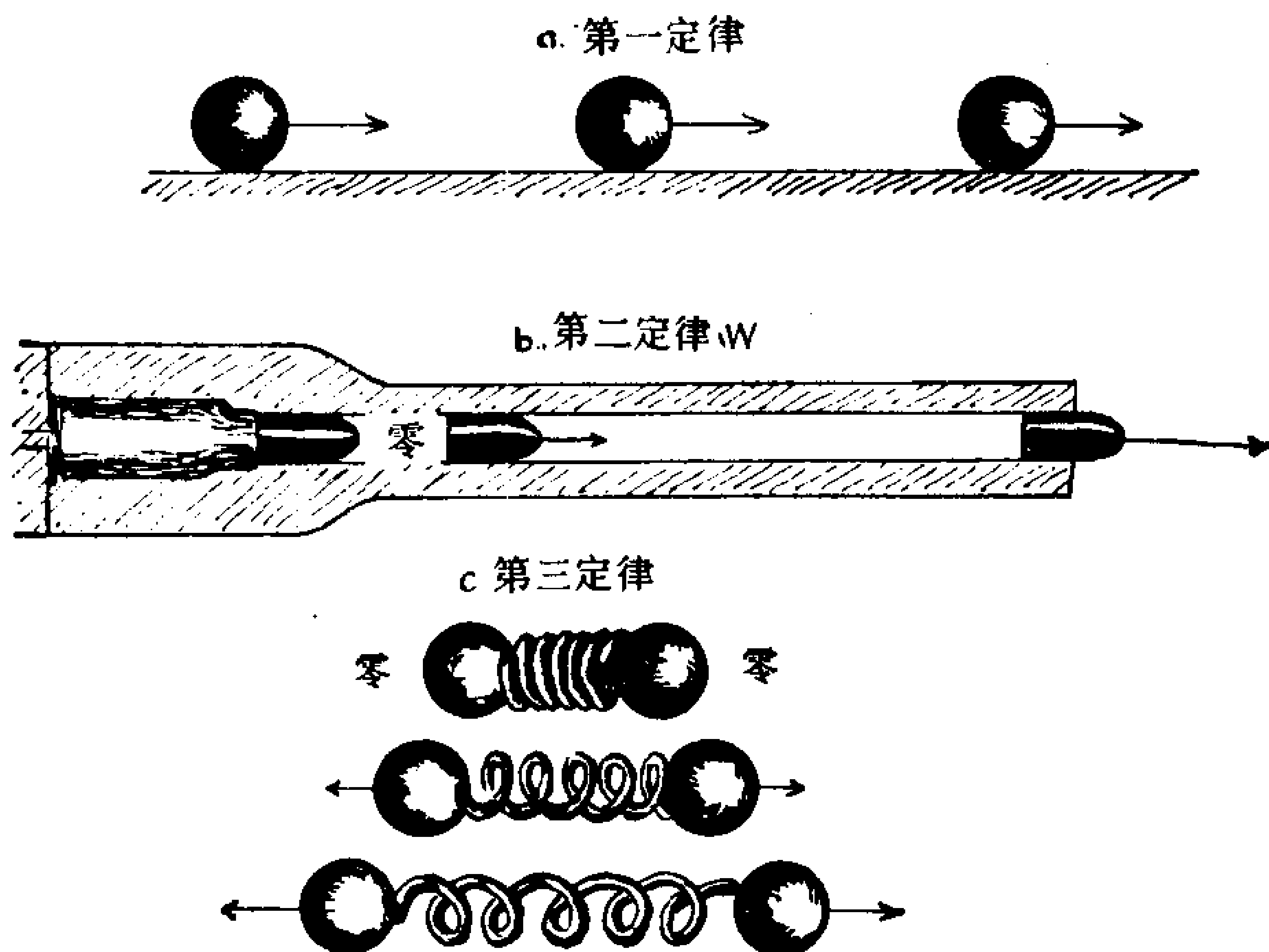


图 III-1　牛顿的三定律：a）水平面上的球在其运动方向不受力的作用时，将以恒定的速度沿直线运动。b)枪筒中的子弹被火药爆发的气体推动，以不断增加的速度运动。c)两个球在置于它们之间的压缩弹簧的作用下，被相等的力所推动。假定如图所示，它们有相等的质量，它们就会以相同的速度向相反方向运动。

当给定的力作用于某一物体，使它移动一定的距离时，该力与这距离的乘积称为这个力所作的功。如果力用达因表示，距离用厘米表示，则量度功的单位称为尔格。工程上使用的能量单位大得多，称为焦耳，1 焦耳等于 10^7 尔格。我们还可以引入功率的单位，它告诉我们单位时间内作了多少功。功率通常用每秒尔格数来度量，它没有什么特殊的名称。工程上是用瓦特，它等于每秒 1 焦耳或每秒 10^7 尔格，也有用马力的，它等于 746 瓦特或 0.746 千瓦。

定律 III: 对每一个作用力，总存在一个相等的反作用力和它对抗；或者说，两个物体彼此施加的相互作用力总是相等的，并各自指向其对方。(图 III-1 c)

不论何物拉引或推压另一个东西时，同样也要被另一个东西所拉引或推压。如果你用手指推压一块石头，那么手指也要被石头所推压。如果一匹马拉引一块系在绳子上的石头，那么这匹马(如果我可以这样说的话)也被相等的力往后拉向石块。至于被拉紧的绳子，由于它同样有使自己松弛或伸直的倾向，将以同样的力把马拉向石头和把石头拉向马，并且它阻止其中前进的力量和推动前进的力量是一样大的……

那么我们可以问，何以是马拉动石头而不是石头拉动马呢？答案当然是因为它们对地面的摩擦力不同。和马拉的石头比较起来，四只马蹄更有力地附着在地面上，如果不是这样的话，石头就会留在原地，而马蹄就要打滑了。要是在石头下面放一些滚轴，那就会减小石头对地面的摩擦力，也就使得马的活儿容易干得多了。如果没有摩擦力(在池塘结冰时的冰面上，这是近似正确的)，两个互相拉或推的物体的运动也不会是一样的，除非它们有完全相等的质量，因为对于给定的力，加速度与质量成反比。如果一个瘦弱的人和一个大胖子面对面地站在冰面上互相推一下，瘦人向后滑的速度就会比胖人大得多。同理，枪的反冲速度远远小于从它的枪口射出的(轻得多的)子弹的速度。

应用反冲原理可以制造各种火箭。火箭燃料燃烧时产生的气体，以很高的速度从喷嘴向后喷出，结果把火箭本身推向前进。燃料烧尽时火箭所获得的最后速度，取决于火箭与燃料的重量比，为了使效果更好，要使这比例尽可能的小。在现代火箭中，空载火箭的重量与燃料的重量之比大约和一个空心蛋壳与蛋体本身的重量比相同。

这里不是讨论现代火箭工程问题的地方，我们只讲一个小故事作为结束，它发生在佛罗里达州卡纳维拉尔大型火箭试验场。在一所地方小学一年级的第一堂课开头，老师想要知道孩子们在读写算这些方面已经懂得多少。“我能数数！”小琼尼自告奋勇。“到前面来数吧！”老师说道。“十，九，八，七，六，五，四，三，二，一……小旦旦*！”

但是，为了回到牛顿而不致突然中断空间飞行的问题，我们要提一下，牛顿乃是第一个有了地球人造卫星观念的人。在“原理”一书的第三编我们读到：

“行星依靠向心力，可以保持在一定的轨道上，这只要考虑一下抛射体的运动，就可以很容易理解了；一块被抛出的石头由于其自身重量的压迫不得不离开直线路径，它本应是按照起初开始的抛射方向走直线的，现在在空气划出的却是一条曲线，它经过这条弯曲的路径最后落到了地面上；抛出时速度越大，它落地前走得就越远。因此我们可以假定抛出的速度不断增大，使得它在到达地面之前能划出 1、2、5、10、100、1000 英里的弧长，最后一直增加到超出了地球的界限，这时石头就要进入空间而碰不到地球了。让 AFB（图 III-2）代表地球表面，C 代表地球中心，VD、VE、VF 代表我们从一个高山顶上（无疑是苏格兰高地的某处）沿着水平方向依次以越来越大的速度抛射一个物体时，它将会划出的曲线；因为在天空运动几乎不受阻碍，进行运动的空间中阻力很小甚至完全没有阻力，所以为了保持条件相同，让我们假定在地球周围不存在空气，或者至少假定空气的阻力很小甚至完全没有阻力。由于同样理由，比较低速度抛射的物体划出较小的弧线 VD，速度较大时弧线 VE 也较大，再增加速度时，物体就走得越来越远，到达 F 和 G。如果速度再不断增加，它最后就会绕过地球的周界，而又回到抛射它的山上来了……

但是，如果我们现在想象物体是从更高的高度沿着水平线方向抛射出去

---

* 译注：原文 *nuts*〔美俚〕睾丸。

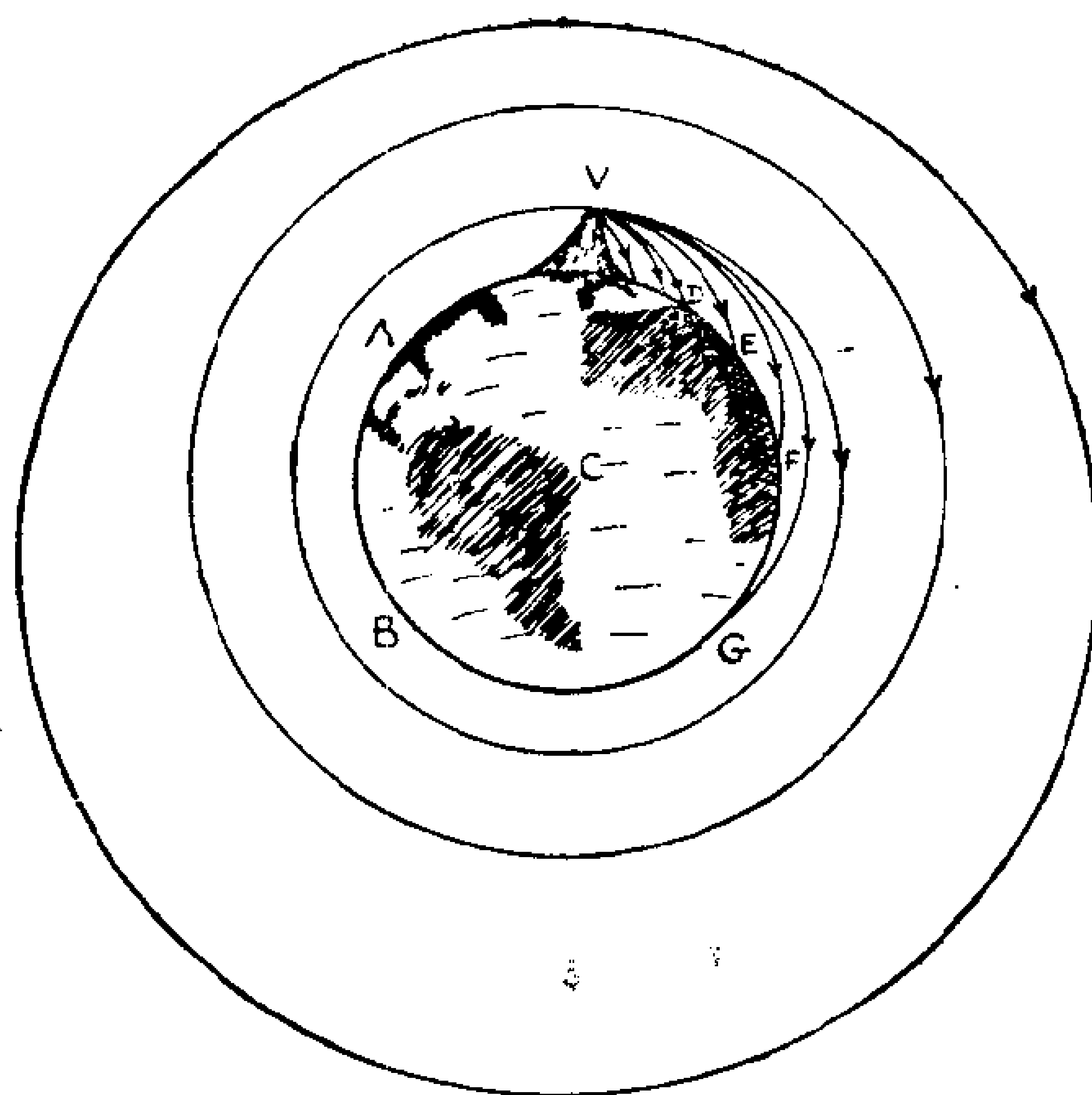


图 III-2　地球卫星的轨迹是从山上发射出去的物体越落越远的轨迹的极限情况。本图是按牛顿原著中的图改画成的。

的，例如从5英里、10英里、100英里、1000英里或更高的高度，甚至高达地球半径的许多倍。那么，这些物体就会按其不同的速度并在不同高度处的不同重力作用下划出一些与地球同心的圆弧或各种偏心的圆弧，它们在天空沿着这些轨道不停地转动，正象行星在自己的轨道上不停地转动一样。"

这段话里包含了这样一个观念：使石头下落和天体运动的有一个共同的原因，它是同一种力，即重力。人们都说这种观念是牛顿观察苹果从树上掉下来而首先想到的。不论这种"苹果理论"真实与否，它却引出了一首有趣的诗，我们把它写在下面：

艾萨克爵士在沉思漫步，
遇见了一位邻居是个农夫，
邻居劝他歇一歇聊聊天，
他正在为引力定律思索良苦。
微风吹拂着盛开淡淡群花的苹果树，

牛顿的这位朋友是果树园的园主。
吹落的果花遍地皆是，
铺满了果园里的条条小路。

* * *

邻人对牛顿说："请留步！
有句话我想对你讲述。
城里人到处在谈论，
你观察了苹果落地，
因此而声名卓著。
请告诉我，这是怎么回事？
先生，请帮我解开这个闷葫芦。"

* * *

"唔，是呀！"牛顿答道"当然可以！
君不见这个力完全相同？
它随着距离 r 的平方而减小，
这距离直到我们忠实的月球，
直到苹果，或迟或早，
请看下一步……"

* * *

"请吧！"邻人说"请快停住！
这都不是我想知道的内容，
我感兴趣的只有一件事：
开满鲜花的苹果树，
还有它那丰硕的果实，枝枝簇簇，
它们在温暖的阳光照耀下成熟，
布满这宁静的乡村小路。
我只想要知道，
一担你要价多少才能满足？"

一位无名作者未发表的俄文诗，
由本书作者译成英语。

为了确立重力与到地心距离的关系，牛顿决定把石头（或苹果)朝地面下落与月球的运动作一比较，根据上述论证，月球的运动也可以看成是一种无终点的下落过程。这样，牛顿就可以比较作用于月球的"天文学上的力"和作用于我们日常物体的"地球上的力"了。

他的论证可以用一种稍经修改的形式表示在图III-3中，图中表示月球M绕着地球E沿着（近似的)圆轨道运动。在位置M处，月球具有一定的速度，它垂直于圆的半径。如果不受力的作用，月球就会沿直线前进，经过一个单位的时间后，它会运动到位置M'。但因为它实际是到达M''的位置，所以应当把$M'M''$看成是月球在向地球自由下落时单位时间内走过的距离。根据毕达哥拉斯定理，$M'M''=\sqrt{(EM)^2+(MM')^2}-EM$（因为$EM''=EM$），用代数方法可以证明它近似地等于$\frac{MM'^2}{2EM}$或$\frac{1}{2}\left(\frac{MM'}{EM}\right)^2\cdot EM$（因为$EM\gg MM'$），这里$\frac{MM'}{EM}$显然是月球绕地球运动时的角速度，即在一秒的时间内月球在其轨道上角位置的变化。因为月球在一个月内划一个整圆，所以其角速度等于2π除以用秒来表示的一个月的时间，即除以$2\cdot66\times10^6$秒。但在讨论加速运动时我们已经看到，第一秒内所走过的距离等于一个称为"加速度"的量的一半，所以我们可以得出结论，维持月球在其圆轨道上的力所产生的加速度等于$\left(\frac{MM'}{EM}\right)^2\cdot EM$。利用上述角速度的数值，并代入月球的距离值384,400千米或3.844×10^{10}厘米，牛顿就得出了重力在月球距离处所产生的加速度值是0.27厘米/秒^2，比重力在地球表面所产生的加速度(981厘米/秒^2)小得多。然而，这两个量与月球的距离和落地苹果到地心的距离两者之间，存在着非常简单的关系。实际上，981与0.27之比是3640，

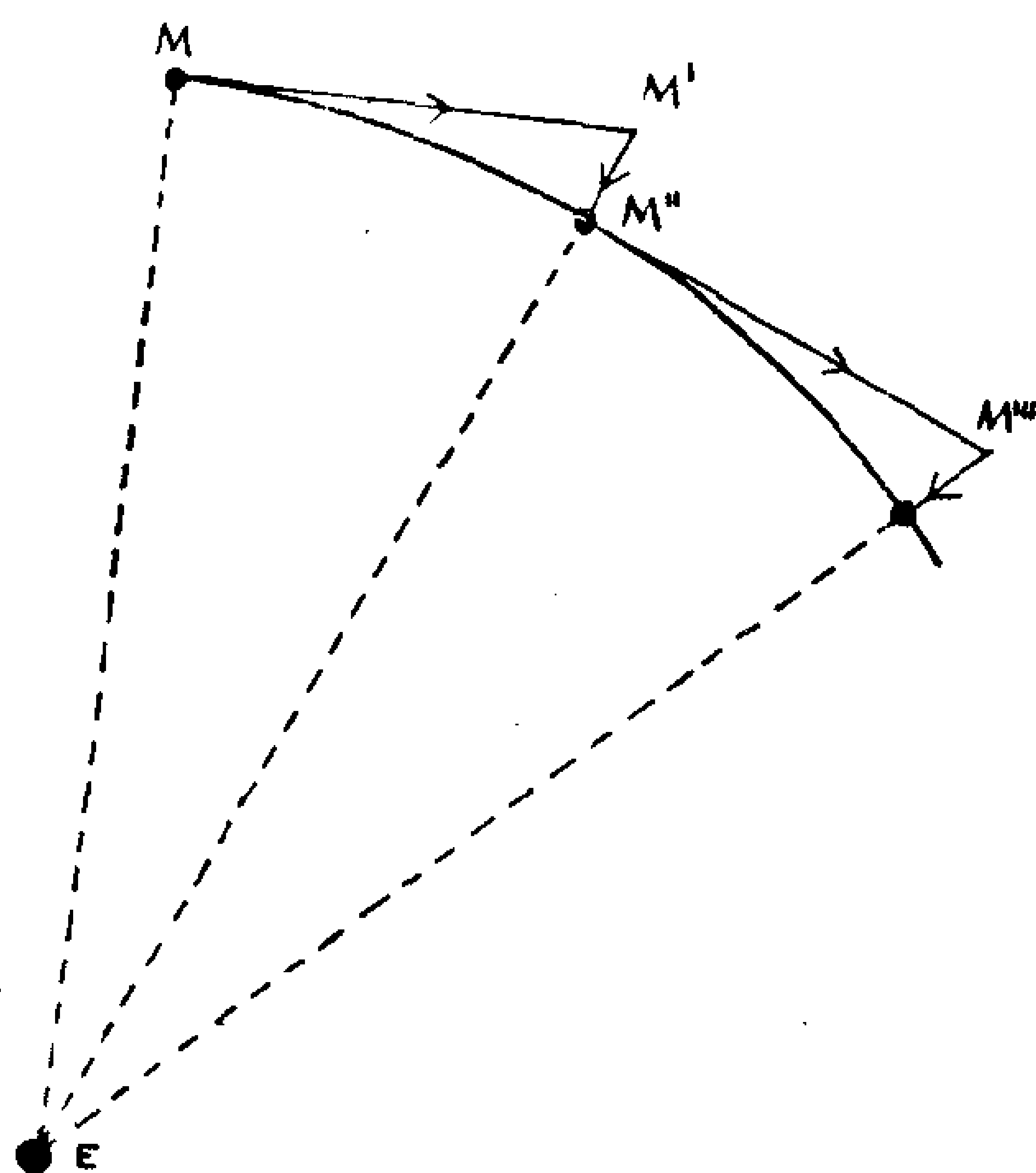


图 III-3 牛顿把月球绕地球的圆运动看成是一种无终点的下落（参见图 III-2），就能算出作用于月球上的重力所产生的加速度。这张图表示计算是如何进行的。

这个数恰好等于月球的轨道半径与地球半径之比的平方。这样，牛顿就得到如下的结果：地心引力随物体到地心距离的平方成反比减小。

牛顿把这一发现推广到宇宙中所有的物体，从而建立了万有引力定律，这个定律说，所有的物体都互相吸引，吸引力的大小与它们的质量成正比，而与它们之间距离的平方成反比。他把这个定律应用到行星绕日的运动，从数学上导出了我们在上一章讲过的开普勒三定律。

十八和十九世纪的伟大数学家们发展了牛顿的工作，导致天文学中一个重要分支的诞生，称为“天体力学”，它使我们能以很高的精确度算出太阳系中的行星在万有引力作用下的运动。天体力学最大的胜利之一，是在 1846 年发现了新的行星海王星，它的存在和轨道是由法国天文学家莱佛瑞尔和英国天文学家亚当斯各自独立地预见到的，其根据是认为天王星的摄动是由于受到了一个当时不知道的行星的引力而引起的。一个类似的事件发生在 1930 年，当时根据理论计算发现了一颗海王星以外的行星，后来称为冥王星。

牛顿把他的引力定律用于地球的运动时，第一次解释了从普

鲁塔奇时代以来就已经知道的岁差现象。他指出，因为地球自转轴与其轨道平面(黄道面)成一倾斜角，所以作用在地球赤道鼓出部分的太阳引力，一定要引起地球的自转轴绕着垂直于黄道面的直线缓慢地转动,转动周期约 26000 年(图 III-4)。这个解释遭到

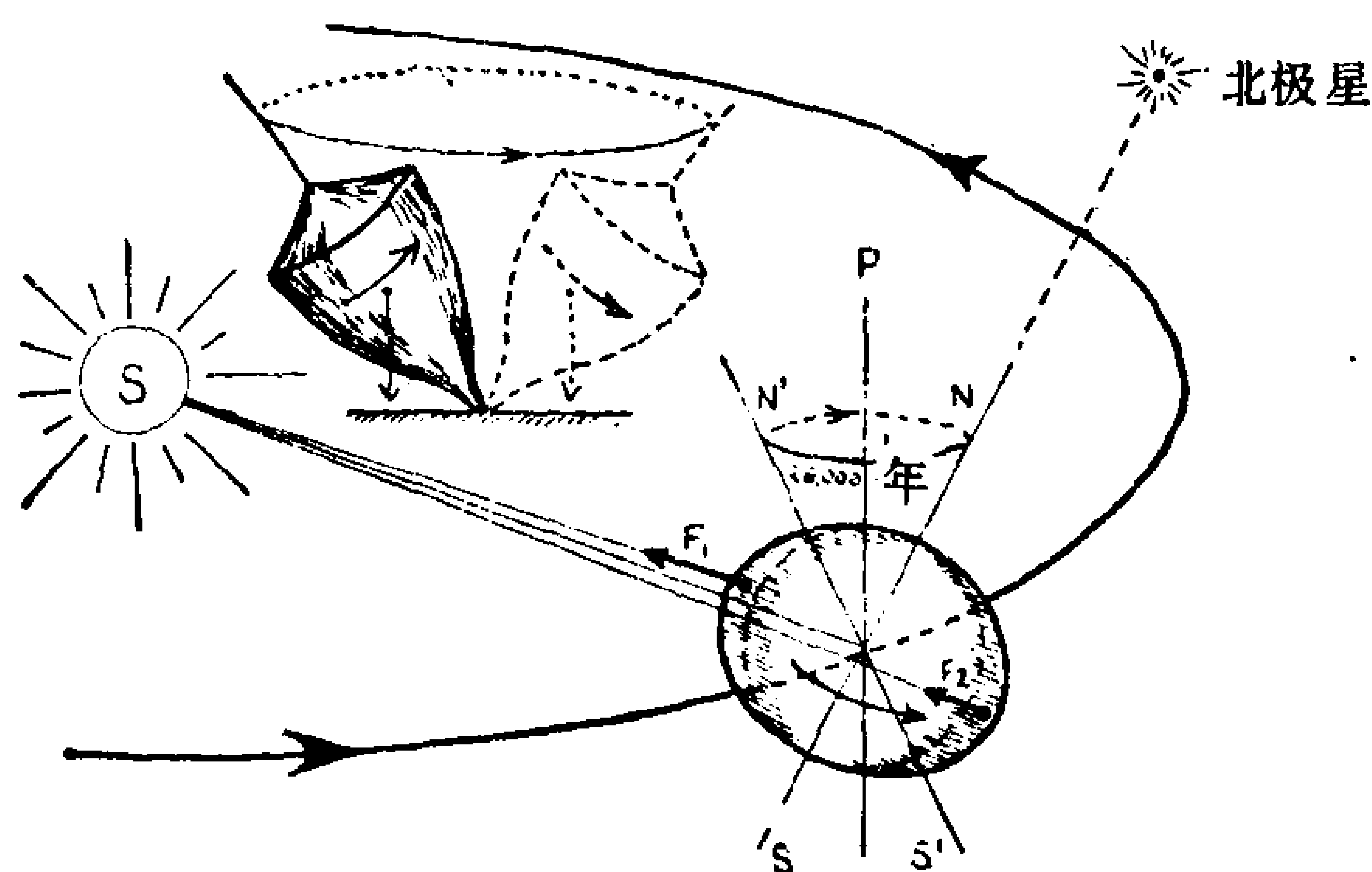


图 III-4 牛顿对地球自转轴产生岁差现象的解释。因为引力随距离的增大而减小，所以作用在面向太阳的赤道鼓出部分上的力 F_1，就比作用在背向太阳的赤道鼓出部分上的力 F_2 大一些。这样，两种趋势的合成作用就产生一个把地球的自转轴“扶直的力”，也就是要使自转轴垂直于轨道平面。这种情况就象我们在一个转轴倾斜的转动陀螺中遇见的情形，这时，重力即陀螺的重量，要使其转轴趋向水平位置。只要陀螺在转动，它就不会倒下来，而仍然立着，但其转轴将绕着垂直线扫出一个锥面。同样，地球的转轴也不会垂直于轨道，而是绕着这个垂直方向扫出一个锥面。

了当时天文学家的强烈反对，因为那时人们根据一些错误的测量结果，以为我们的地球不是象南瓜的形状那样在赤道部分略宽一些,而是更象西瓜那样,两极之间的距离比赤道的直径大。

为了解决这一争论，法国数学家德·莫泊特斯组织了一次探险,冒着遭遇到狼群的很大危险,到拉普兰(芬兰北部区域)去测量北纬子午线一度的长度。他的测量证明,牛顿的观点是正确的,伏尔泰写信跟他开玩笑说:

你为证实它，在不毛之地奔跑，

牛顿坐在家里就已知道。

牛顿遵循同样的思想线索解释了潮汐现象，认为那是由于太阳作用在地球上的引力对面向它的半球和背向它的半球的作用不相等而引起的（图III-5）。

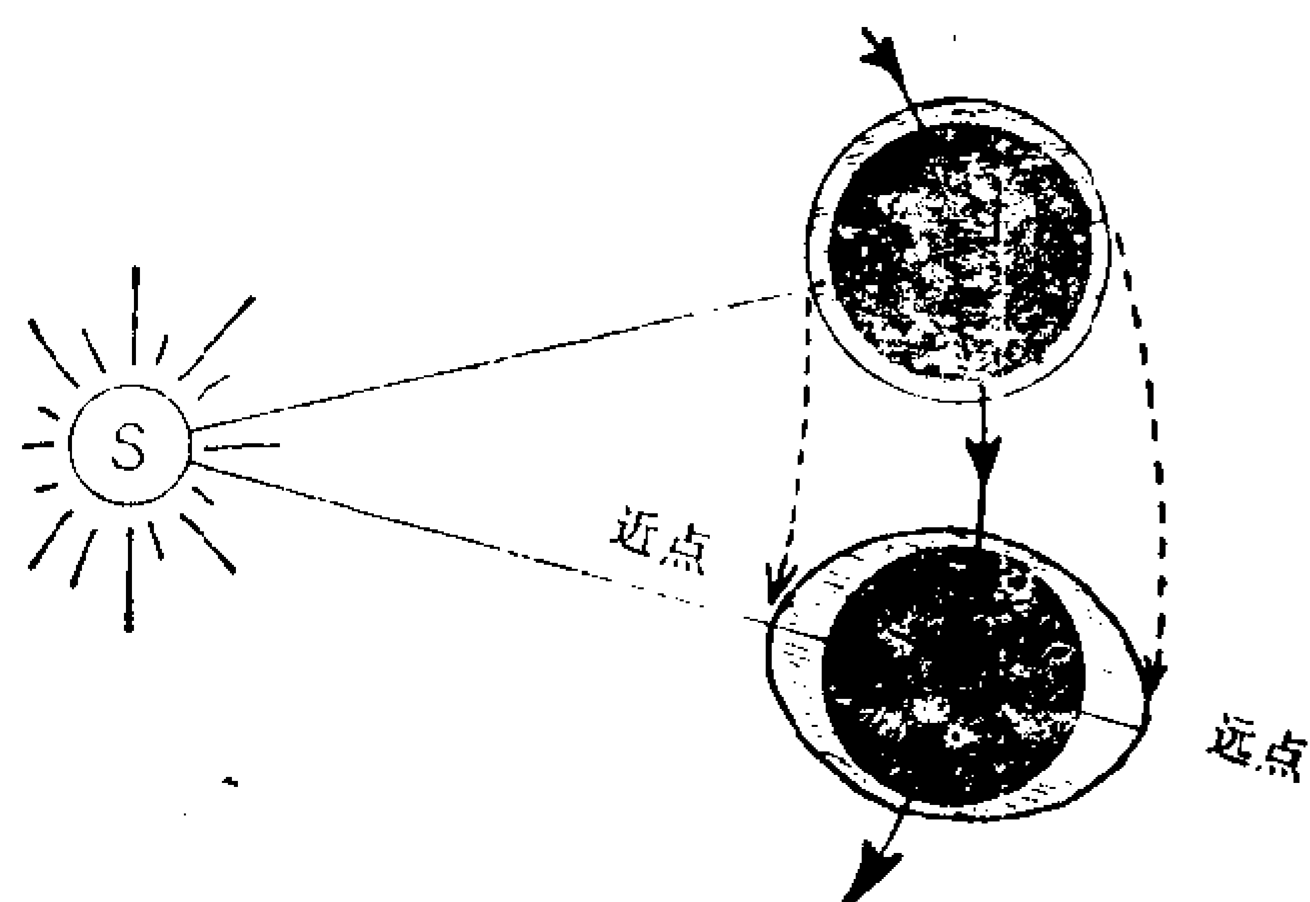


图 III-5 牛顿对潮汐现象的解释。因为引力随着到太阳的距离增大而减小，所以作用在地球白昼一边海水上的力比作用在地球固体部分的大一些。同理，作用在地球黑夜一边海水上的力比作用在固体部分的力小些。由于这些差别，白昼一边的海面就有在海底上面升得更高的趋势，而黑夜一边的海底则被从海面“拉下”。这两种效果都造成两边海水向外鼓，若与地球绕其轴的转动结合起来，可以观察到两次潮汐波绕着地球跑，其周期是24小时。

长达626页的牛顿的《原理》，集中了关于固体和流体力学的所有部门的知识，但我们在这里准备仅仅再介绍一个问题，因为它比较简单而又有趣。这就是以一定的初始速度抛射出的物体通过空气或水这类阻尼介质时如何运动的问题。在停下来之前，它们能运动多远呢？

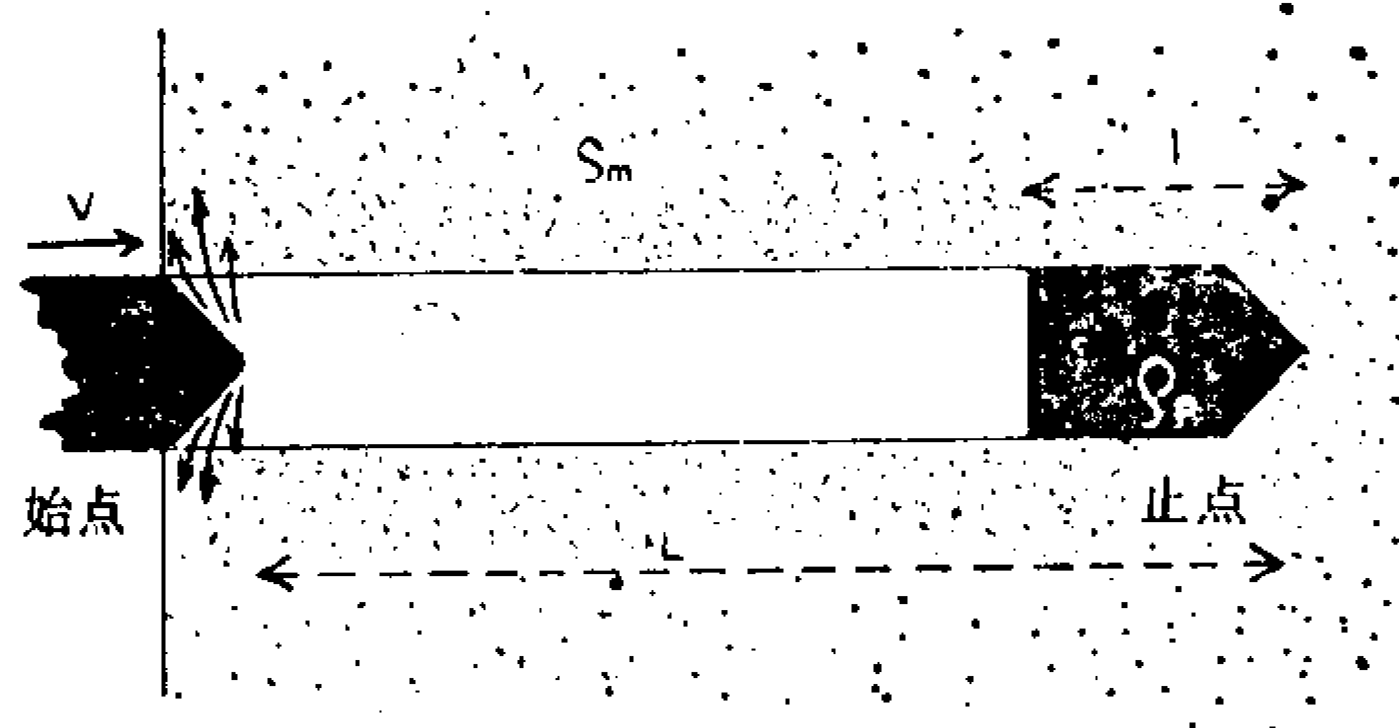


图 III-6 牛顿关于子弹射入介质的理论

情况如图III-6所示，图中画的是一粒子弹从枪膛中射出，通过空气或水向前运动。子弹在介质中运动时，显然要把介质向外推开，以便

拨出一条隧道向前运动。在高速度下,摩擦力相对来说不太重要,子弹的能量损失主要是由于它必须传给介质以高速度,把介质推开。容易看出,介质的这一旁移速度,大约与子弹前进的速度相同。所以,当旁移介质的质量与子弹本身的质量具有相同数量级时,子弹就要停下来。由此可见,隧道的长度和子弹的长度之比与子弹物质的密度和介质密度之比必须保持相同,即

$$\frac{L}{l}=\frac{\rho_P}{\rho_m} \quad \text{（近似成立）}$$

它当然只是很近似地正确的。但尽管如此,我们从它还是可以得出几个很有趣的结果。如果我们是把一粒钢质子弹(其密度约为水的 10 倍)射入空气(其密度约比水的小 1000 倍)中,则可预期子弹通过其本身长度的大约 10000 倍距离以后就要停下来(如果在此之前它没有落到地上的话)。这样,大型的海军炮弹至少要有 5 英尺长,才可以指望它能飞过 50000 英尺或 10 英里以上的距离。而从女用左轮枪射出的半英寸长的子弹,将很难射出 400 码以外。至于在水中——水的密度大约只比金属小 10 倍,子弹通过仅仅10 倍于本身长度之后就会失去它的绝大部分能量;这就是为什么潜水员要用长金属箭来猎取水下动物的原因。值得指出的是,穿透长度与抛射体的初始速度没有多大关系(只要初始速度足够大)。这件事曾使美国的军事专家大惑不解,他们曾从不同的高度扔下炸弹,这些炸弹预定在爆炸前要深深钻入地下。但穿透力似乎不随扔炸弹时的高度(因此它们击中地面时的速度也不同)而变化,专家们对此抓耳搔腮,不明其故,直到有人向他们指出了牛顿的“原理”中关于这个问题的理论,他们才算明白了其中的道理。

流体静力学与流体动力学

法国数学家帕斯卡和瑞士物理学家伯努力补充和发展了艾萨克爵士关于流体平衡问题和流体运动的研究工作，帕斯卡在牛顿

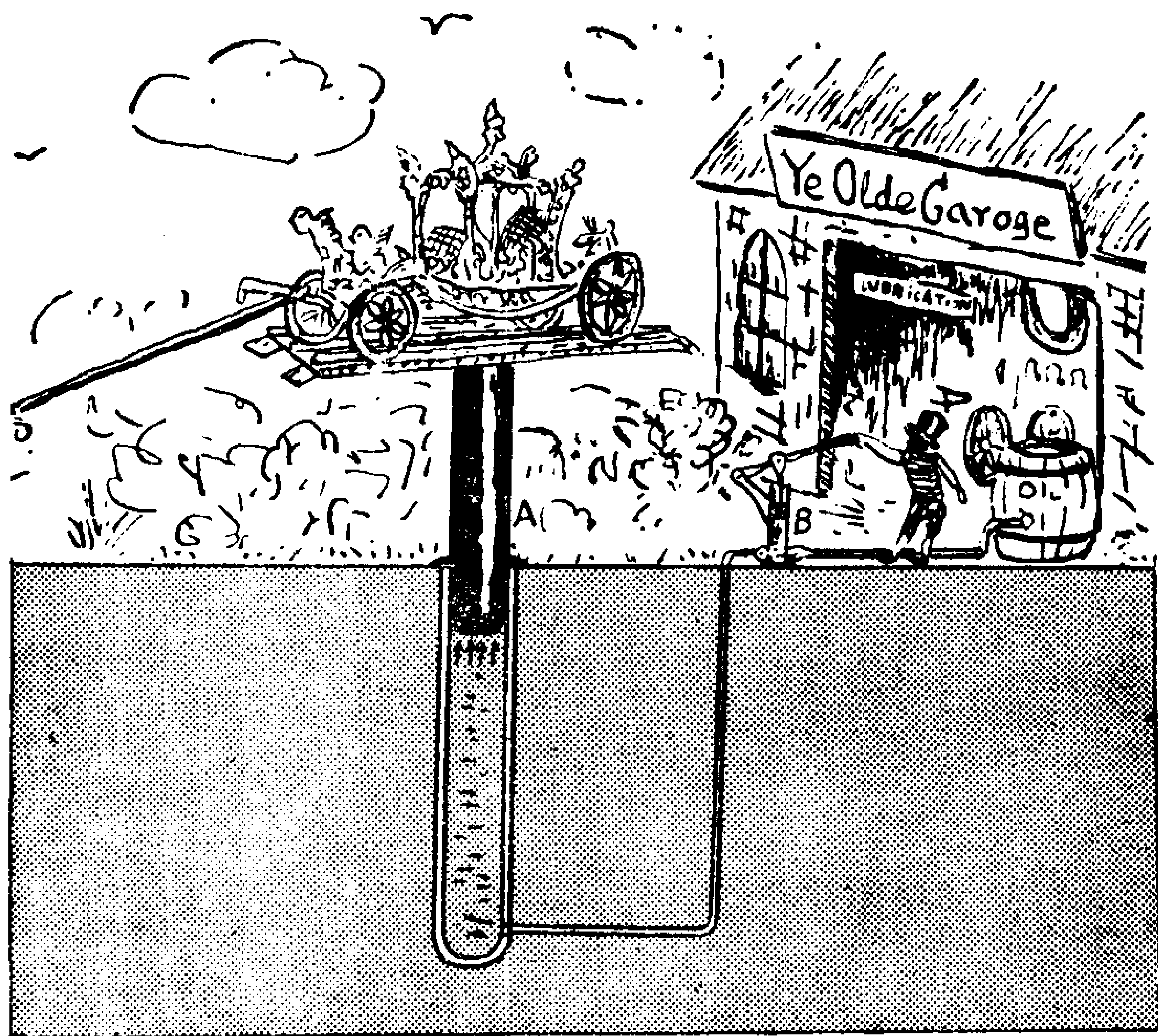
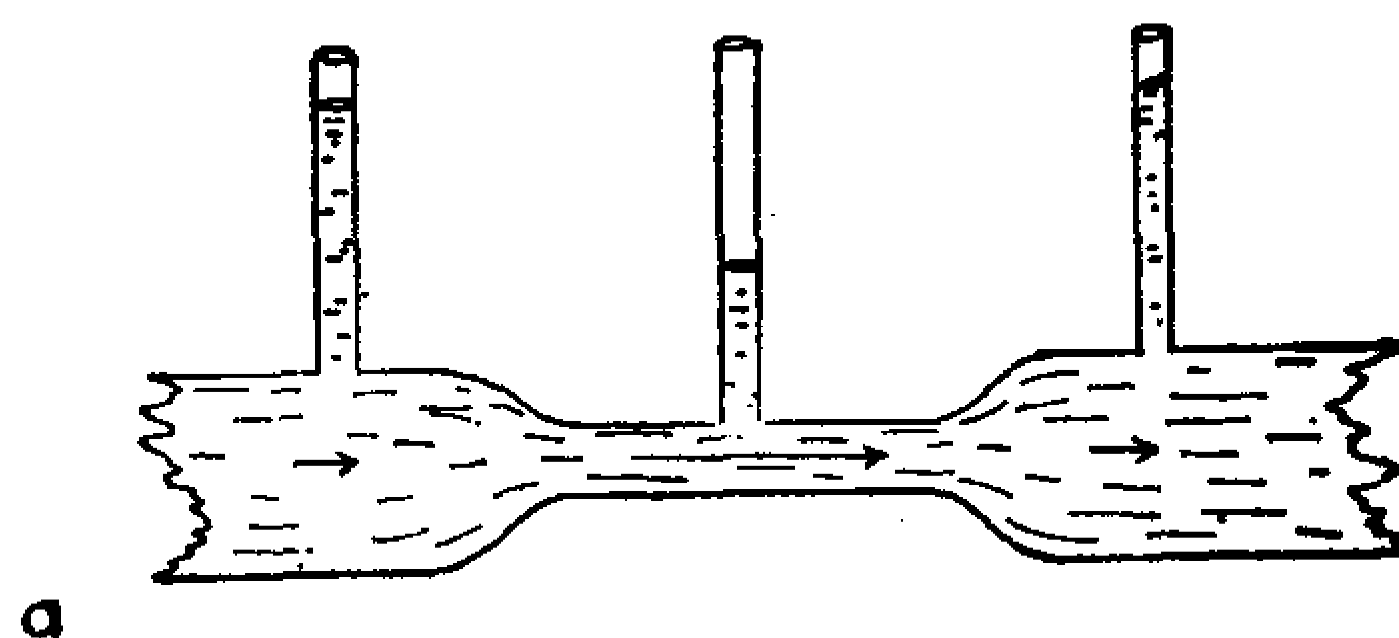


图 III-7 根据帕斯卡原理，一只手所施加的力可以抬起一辆沉重的马车。

出生的那一年是 19 岁，伯努力在牛顿去世的那一年是 27 岁。帕斯卡定律与阿基米德定律一起奠定了流体静力学的基础，这个定律说，关在密闭容器内的流体(不论是液体或气体)对容器的任何一部分单位面积上施加的压力都相等。帕斯卡原理对于制造各种水压装置有着广泛的应用。事实上，如果我们有两只圆筒 A 和 B (图 III-7)，它们的直径不同，用一根细管将其相联并装上活塞，作

用在大圆筒中活塞上的总的力就比作用在小圆筒活塞上的大，两者之比等于其面积比。因此，用手对小圆筒中的活塞施加一个较小的力，结果就会在大圆筒活塞上产生一个大很多的力，能把一辆沉重的马车抬起来。但付出的代价是，大筒中活塞的位移要比小筒活塞的位移相应地小很多。





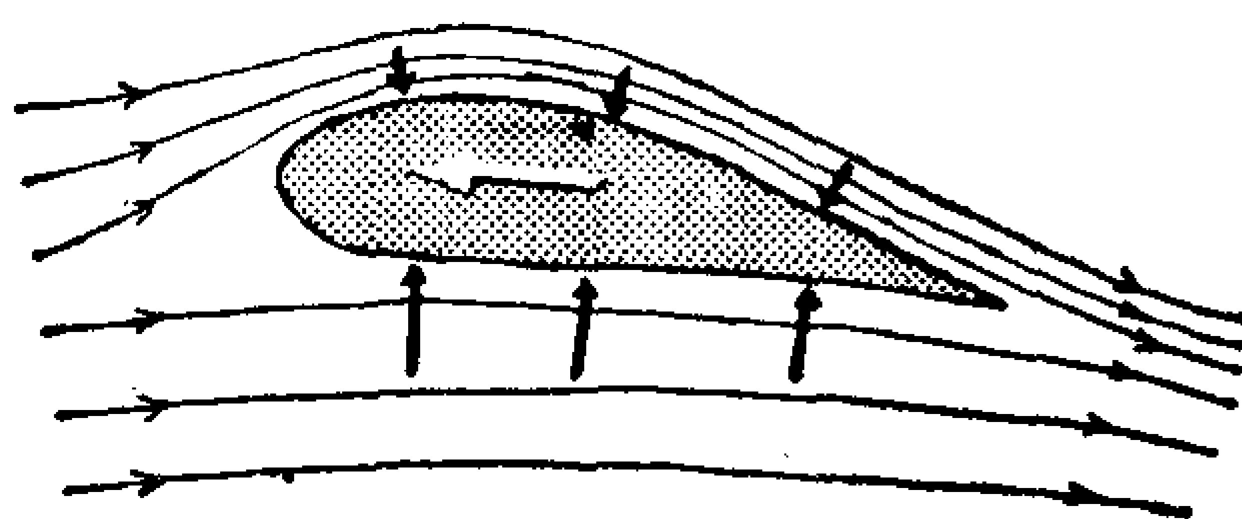


图 III-8　伯努力原理 a)简单的演示，b)魔管，c)机翼是怎样工作的。

伯努力定律（常称为伯努力原理）是关于流体在直径变化的管子中的运动状况的，乍看起来它似乎与常识相反。设想有一根水平放置的粗管子，其中某处变窄，随后又粗起来（图 III-8 a)。水在管子里流动，它在不同截面上的压力可通过一些与水平主管的置于各处的垂直管子水柱的高度来测量。乍一看来，管中窄截面处的压力似乎要大一些，因为水要"挤过"它。但是，直接的实验表明情况完全相反，水的压强在窄截面处比宽处要小。考虑一下管中不同截面处水流速度的变化就可以解释这种现象。截面宽时水流得较慢，而在进入窄截面时就变快。要使水的运动加速，在该方向上就必须有力的作用，而在这里我们可以想到的唯一的

力就是管子宽处与窄处之间的压强差。因为水在进入窄管后速度增大，在水流方向必须有力的作用，所以宽管中的压强就必须大于窄管中的压强。

不必请管子工，只要你取一段玻璃管（用烟嘴大概也行）、一张圆形硬纸板和一根针来，就可以实际证明上述事实（图 III-8 b）。你把针插在纸板中心，把它放入管内，如图所示，纸板的重量就把它压在管端。现在你若在管子的另一端吹气，你可能料想纸板很容易会被吹走。试一试看，你将会发现根本不是那么回事，你越用劲吹，纸板在管子末端就贴得越紧。解释这个现象的依据是伯努力原理。吹入管中的空气必须通过管子一端与贴在上面的纸板之间的圆形窄缝才能逸出，这条通路要比管子本身窄得多，所以这里的空气压强要比大气压强低得多。这样，外面的空气压力就把纸板紧压在管子末端了。

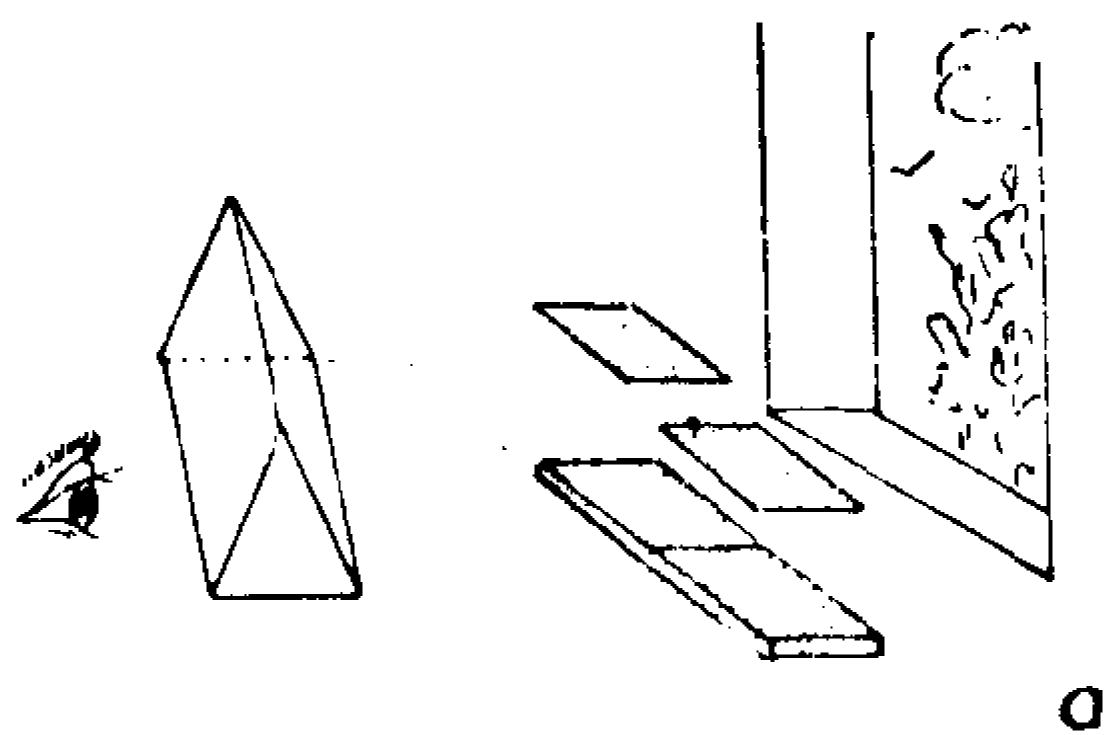
伯努力效应还可以解释飞机机翼的升力。如图 III-8 c 所示，机翼的剖面是这样的：空气从机翼上面运动过去时，从前沿到后沿的距离要比它从下面过去时长一些。结果，在机翼上面运动的空气团就比下面运动的空气团速度大，根据伯努力原理，其压强也就较低。这两个压强之差就提供了飞机的升力。

光　学

我们对牛顿力学的讨论必须到此为止，以便留一些篇幅来讨论他的光学。牛顿在光学上的主要贡献是对颜色的研究，他基本上证明了，白光实际上是从红到紫的不同颜色的光线的混合。牛顿对光学的研究实际上先于他在《原理》中所描述的力学方面的基本工作。他在 23 岁买了一块玻璃棱镜，“来试一试有关颜色的现象”，可能他在这方面的全部基本发现，都要追溯到他一生的这段

时期。但在 1692 年 2 月的一天，当他去作礼拜时房间失火了，这偶然烧起来的大火把他 20 年来关于实验和研究成果的论文都毁掉了，其中包括了光学方面的大量工作。因此，牛顿《光学》一书直到 1704 年才出第一版。我们只是不知道这一迟误实际上是因为火灾，还是因为牛顿在他顽固的对手胡克的反对面前不愿意发表他的思想，因为胡克刚好是在牛顿将其《光学；或论光的反射、折射、弯曲和颜色》一书付印的前一年去世的。早在这本书中，他就描述了一个简单实验，证明不同颜色的光有着不同的**折射率**。

为了证明这一点，他用一块长纸板，一半涂成鲜红色，另一半涂成蓝色，把它放在窗户边，通过一块玻璃棱镜来观察它（图 III-9 a）。用牛顿自己的话说，他"发现如果把棱镜的折射棱角朝上，使纸板由于折射看起来象是被抬高了，那么折射的结果将使蓝色半边比红色半边升得更高。但是，当折射棱角朝下，使纸板由于折射看起来象是被放低时，蓝的半边就比红的半边降得更低了。"他根据这个实验断定，蓝光折射得比红光更厉害些，并得出结论说，透镜在聚光时，蓝光和红光一定是聚集在离透镜不同距离的地方。为了证明这个结论，他拿一张纸，半边涂上蓝色，另一半涂红色，用蜡烛作照明（"因为实验是



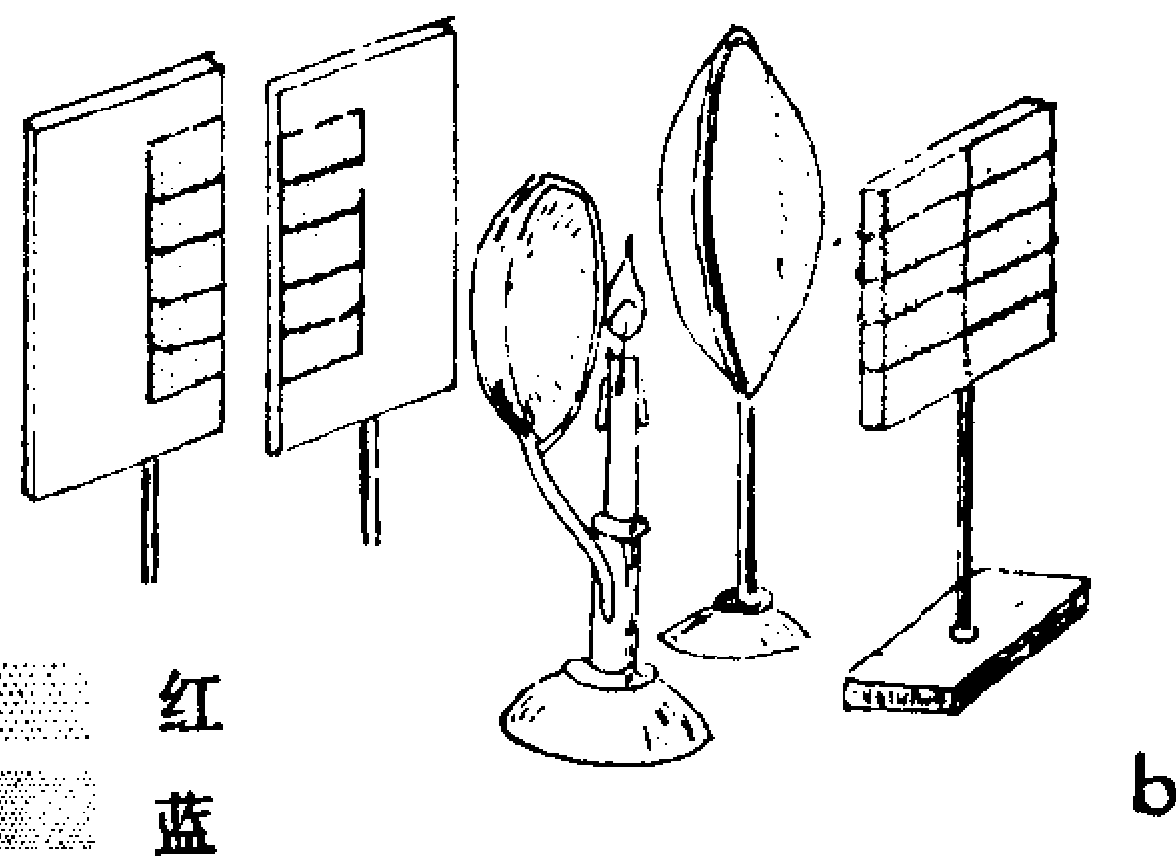


图 III-9　牛顿的光的折射实验

在晚上作的”)，并利用透镜试图在另一张纸上得到清晰的像（图III-9 b)。为了判断像的清晰程度，他用黑线在纸上横绕了几圈。果不出他所料，他无法使涂色纸片的两边同时聚焦，“我努力记下涂色纸片红半边和蓝半边的像显得最清楚的位置，我发现在纸片红半边显得清楚的地方，蓝半边就显得模糊了，它上面的黑线几乎看不出来；相反，在蓝半边显得最清楚的地方，红半边又模糊了，它上面的黑线也几乎看不到”。而且也不出所料，纸片蓝半边的像是在离透镜更近的距离处看得比红半边清楚。

牛顿的另一个实验是观察白色阳光通过棱镜时所发生的情况。他在窗帘上开了一个小孔，把一块棱镜放在阳光通过小孔后形成的狭窄光束的路径上，并在棱镜的后面挂了一个洁白的屏幕。他在屏幕上看到的并不是圆形的太阳影像（小孔成像）——要是没有棱镜，就会是这种情况——而是看到了一个被拉长了的像，其顶端呈现浅蓝色，底部呈现淡红色。这就使他想到，白色阳光也许是由不同颜色的光线所组成的，其中包括最容易折射的蓝色光直到最难折射的红色光。如果是这样的话，屏上被拉长的像就应当是太阳的许多不同颜色的像叠加而成的，只在两端的位置会是纯蓝色和纯红色。为了避免太阳的像在屏上重叠起来，他在光束上放入一个透镜，它会把窗帘上小孔的像聚焦在屏上（图 III-10)，并满意地看到了一条垂直的彩色光带：红、橙、黄、绿、蓝和紫色，以及所有的中间颜色。这就是第一个分光镜，也是第一次证明了日光是由具有不同折射率的不同颜色的光所组成的。

对今天的读者来说，牛顿用棱镜做的实验也许显得太幼稚了，因为事实上，今天每个小孩都可以轻而易举地做到这些。但在他那个时代就完全不同了，那时人们都以为白色阳光通过美丽的古老大教堂的彩色玻璃窗之所以变得五颜六色，就好象是白衣服放

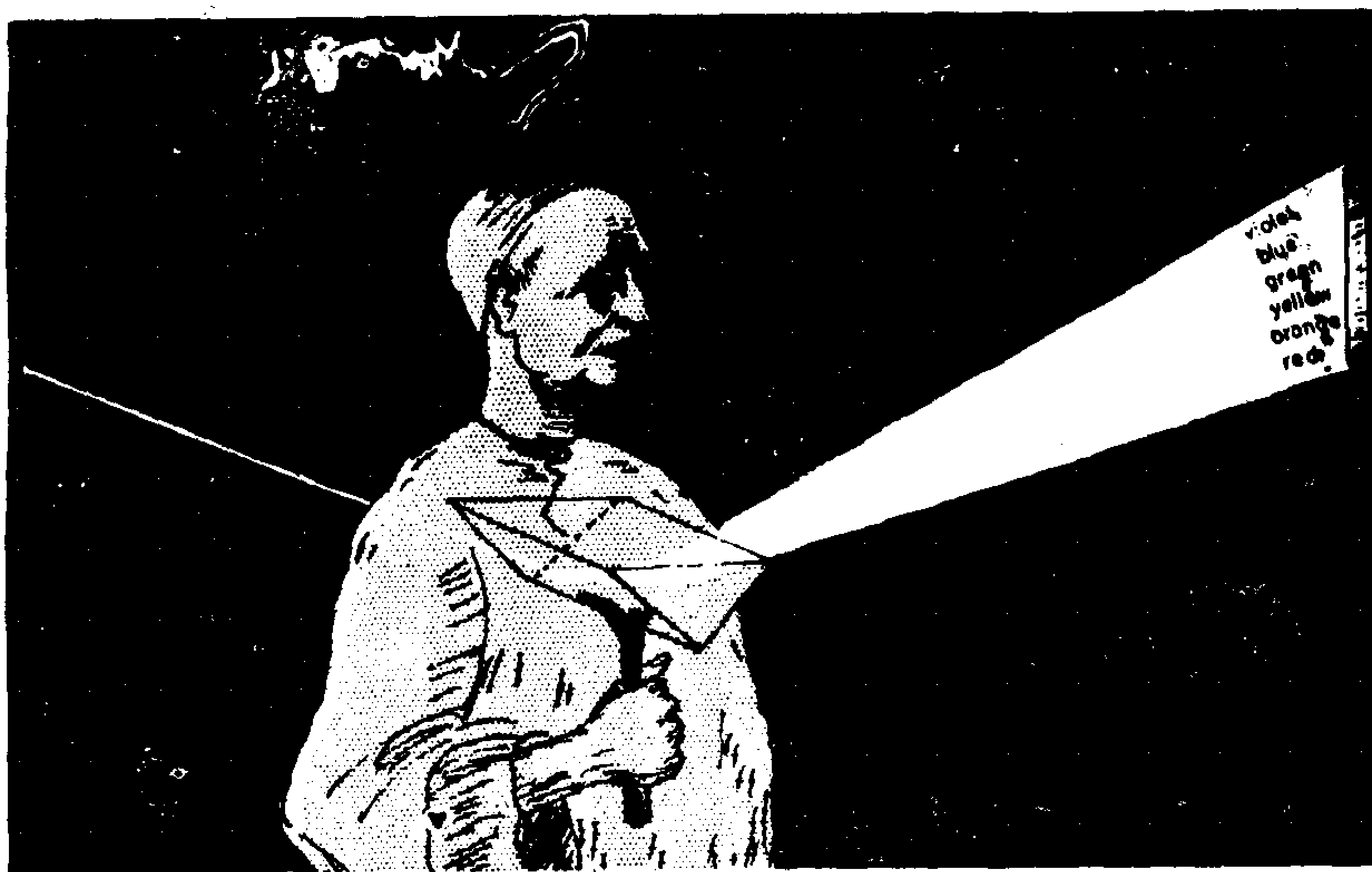


图 III-10　艾萨克·牛顿爵士演示白色是由许多谱色复合构成的

入了不同染料的溶液中被染了色一样。现在我们知道，人眼的网膜中有三种感色神经细胞，分别对红光、绿光和蓝光有反应。当所有的谱色都按照它们在太阳光中那样的比例出现时（视觉器官就是在阳光下经过千百万年的器官进化而发展起来的），我们就可得到“平常的”或所谓“白色的”光感觉。只有一部分谱色出现时，我们就可得到不同颜色的感觉。

不同颜色的光线具有不同的折射本领，牛顿这个发现的重要应用之一就是他关于虹的理论。当天空一边是阳光普照而另一边是乌云密布的时候，就会出现这种美丽的彩色图案了。根据牛顿的解释，我们这时看到的实际上是被云中或落下的微小水滴所反射的阳光。图 III-11 取自牛顿《光学》一书中的原图，表示了实际

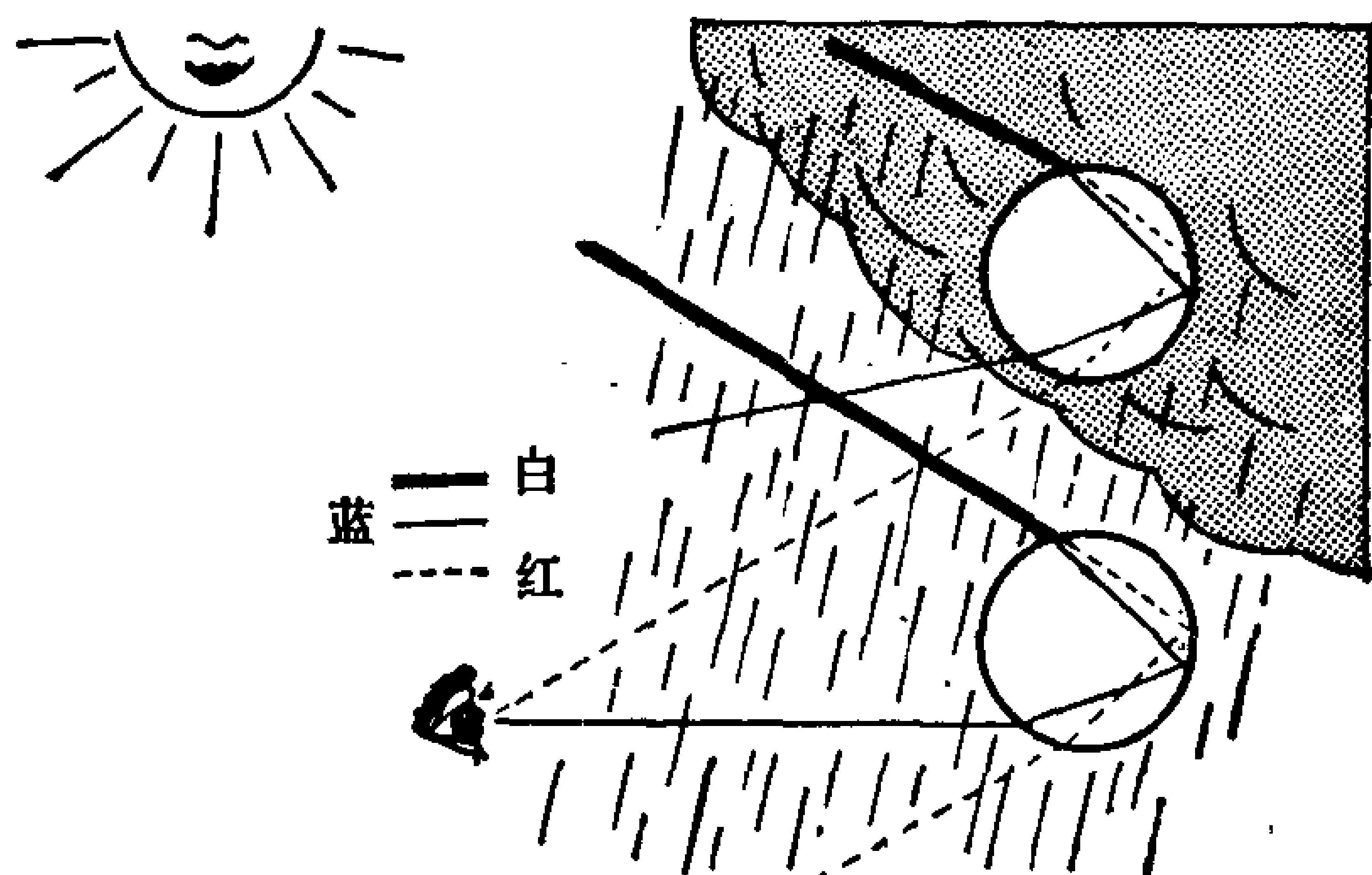


图 III-11 牛顿对虹色的解释

所发生的情况。太阳发出的白光(图中用黑线表示*)射到水滴上,在进入水滴时被折射。接着它经过一次内反射和第二次折射从水滴出来。结果,不同颜色的光线在离开水滴后就被散开成扇形,地上的观察者若是背向太阳,在天空的不同地方就看到不同的颜色。如若出现几条同心的虹,可以用如下的假设来解释:太阳发出的光线在雨滴内不是被反射了一次,而是多次。这里我们也要提一提所谓"圣圈"的现象,这是一种无色的圆弧,有时在太阳周围特别是在月亮周围可以看到。与虹的成因相反,它们的产生是由于光在细小的冰的晶体上反射(不是折射),这些冰的晶体构成了气象学中称之为卷云的高空云层。

牛顿证明了不同颜色的光具有不同的折射本领之后,便错误地断定透镜在成像时是有根本缺点的,用它们不能形成清晰的物像,因为不同颜色的光线不能聚焦于同一地点。这使他认为,象伽利略用透镜造的望远镜是不够完善的,而要用一种根据光的反射

* 用黑线表示白光是因为白纸上无法画出白线。此外,我们以后在本书中将看到,物理学家常把白光称为"黑体辐射",因为白热的黑体(如炭)可以发射最好的白光。

原理造的望远镜来代替,因为光的反射与颜色无关。这样,他就在1672年造出了一台反射望远镜(简称“反射镜”),如图III-12所示。其中有一个抛物镜面M,使天体在管中某点O成像。在光线到达O之前,它们先被一面置于管轴上的小镜M'所反射,偏转到管外一点O',在这点就可以看到天体的像。牛顿这里的错误就在

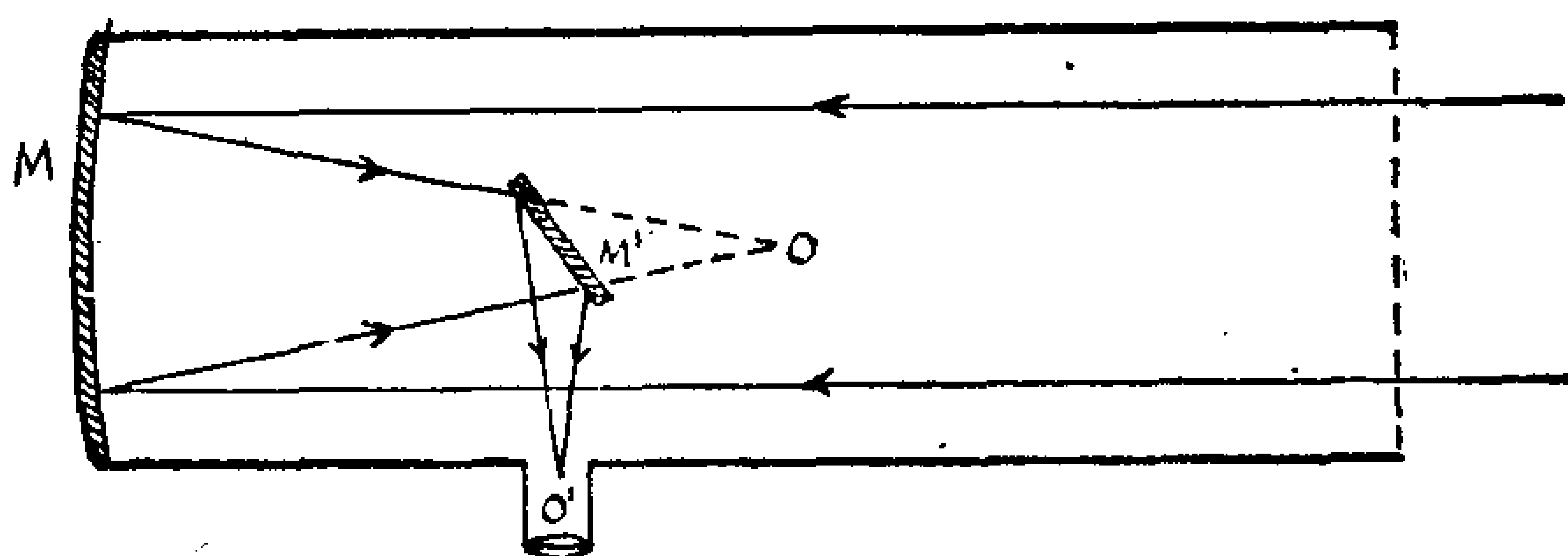


图 III-12　牛顿的反射望远镜

于,他以为不同的透明物质是以相同的方式折射不同颜色的光线的。牛顿死后人们才发现这个假设并不正确,实际上,我们可以用不同种类的玻璃(如冕牌玻璃,铅玻璃等等)制成的复合透镜把红光和蓝光聚焦在同一点。但是,尽管如此,用大型抛物镜面代替透镜的反射望远镜还是具有许多其它实用优点的。事实上,今天两台最大的天文望远镜(一台100英寸的在威尔逊山,另一台200英寸的在帕洛马山)就是反射望远镜。

牛顿另一项精采的发现是所谓“牛顿环”,当我们把一块凸透镜放在一块平板玻璃上时,在接触点的周围就形成牛顿环。牛顿是用下面这样的话来叙述这项工作的:

“有人曾经观察到,象玻璃、水和空气等等这类透明的物质,尽管在厚时显得是很透明无色的,但当它们被吹成泡泡而变得很薄或被制成薄板时,就按厚薄不同而显示出不同的颜色了。我在(本书的前面)曾避免讨论这些颜色的问题,因为它们考虑起来似乎比较困难,对于那里所讨论的确立光的性

质问题似乎也并不必要。但是，为了完善光的理论，特别是与颜色或透明度有关的那一部分自然界物体的构造问题，它们也许会导致进一步发现；所以我决定在这里说明一下它们……

我取来两块玻璃体，一是14英尺望远镜用的平凸透镜，另一是50英尺左右望远镜用的大型双凸透镜；而在双凸透镜上放上平凸透镜，使其平面一边向下，这时我慢慢把它们压紧，使得圆环的中心陆续现出各种颜色，然后我再把上面的玻璃镜慢慢抬起，使之离开下面的玻璃体，于是这些颜色又在圆环中心相继消失。在压紧玻璃体时，在别的颜色中心最后现出的颜色，初次出现时看起来象是一个从周边到中心几乎均匀的色环，再压紧玻璃体时，这色环会逐渐变宽，直到新的颜色在其中心现出，而它就成为包在新色环周围的色环。再进一步压紧玻璃体时，这个环的直径会不断增大，而其周边的宽度则减小，直到另一新的颜色在最后一个色环的中心现出：如此继续下去，第三、第四、第五种以及跟着的别种颜色不断在中心现出，并成为包在最内层颜色外面的一组色环，最后一种颜色是黑点。反之，若是抬起上面的玻璃镜使其离开下面的透镜；色环的直径就会缩小，其周边宽度则增大，直到其颜色陆续到达中心，后来它们的宽度变得相当大，我就比以前更容易认出和识别它们的色种了。我就用这种办法观察了它们如下的顺序和份量。

在透镜接触点处所形成的透明中心点之后，接着出现的是蓝色、白色、黄色和红色。蓝色的量很小，以致我无法在透镜所形成的环中认出它，紫色在环中也不太能识别出来，但黄色和红色都相当丰富，看起来与白色的程度差不多，比蓝色要强四五倍。紧接着包在这些色环外面的色环的颜色次序是紫色、蓝色、绿色、黄色和红色：这些颜色都很清晰鲜明，只是绿色的量很小，似乎比其它颜色显得模糊暗淡得多。在其余四种当中，紫色的量最小，蓝色又小于黄色和红色。第三组环的顺序是紫、蓝、绿、黄和红色；其中紫色似乎比前一组环中的紫色略带些红，绿色就显著得多了，别的颜色也一样鲜明而丰满，例外的是黄色，但红色开始变淡了，更接近紫色。在此之后，是由绿色和红色所组成的第四组色环，其中绿色十分鲜明丰富，一边现蓝色，而另一边现黄色。但在这第四组色环里，没有紫色，蓝色也没有，黄色和红色很不完全，也不鲜明。以后的各组色环也越来越变得模糊不清了，到三轮以后，它们终于成为一片白色了。”

（在照片 I 中，上图是用单色光即单一波长的光所得到的牛顿环的照片。）

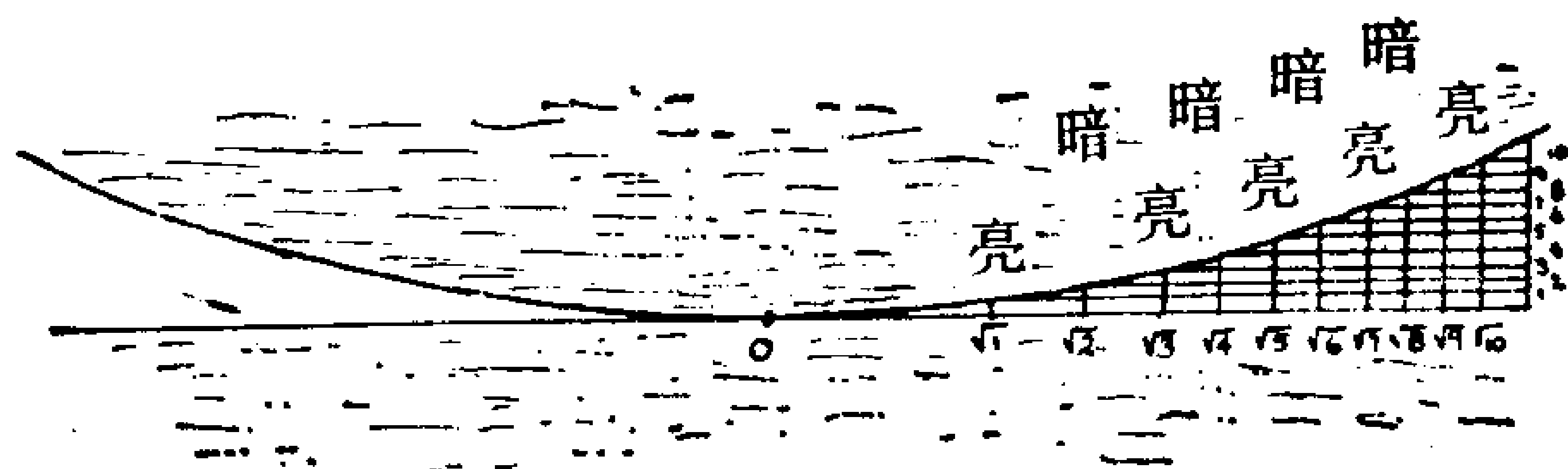


图 III-13　牛顿环的形成

牛顿测量了前六个环的半径之后（在其最亮的部分测量），发现其平方是一个由奇数所构成的算术级数，即 1, 3, 5, 7, 9, 11。另一方面，暗环半径的平方是一由偶数构成的算术级数，即 2, 4, 6, 8, 10, 12。这种情况如图 III-13 所示，该图表示凸透镜与平板玻璃在接触点附近的横断面。水平轴画出了用整数的平方根标的距离：$\sqrt{1}=1$，$\sqrt{2}=1.41$，$\sqrt{3}=1.73$，$\sqrt{4}=2$，$\sqrt{5}=2.24$ 等等，在这些距离处牛顿观察到了交替出现的光的极大值和极小值。我们从图中看到，两玻璃之间的垂直距离是按简单的算术级数 1, 2, 3, 4, 5, 6……而增大的，这点也可以用数学方法来证明。知道凸透镜的半径后，牛顿很容易就算出了暗环和亮环出现地点的空气层厚度，他写道：

"……用垂直入射的光线得到的第一个暗环的最暗部分的空气层厚度是 $\frac{1}{89000}$ 英寸，这个厚度的一半乘以级数 1, 3, 5, 7, 9, 11，就可给出所有亮环的最亮部分的空气层厚度，即 $\frac{1}{178000}$，$\frac{3}{178000}$，$\frac{5}{178000}$，$\frac{7}{178000}$……，它们的算术平均值 $\frac{2}{178000}$，$\frac{4}{178000}$，$\frac{6}{178000}$ 等等则是暗环最暗部分的空气层厚度。"

与上面引述的牛顿认为薄气层的各种颜色"对于确立光的性

质问题似乎也并不要”的主张正相反，牛顿环乃是光具有波动性的最好证明之一，其真确性是牛顿至死都不想承认的。一系列光环的出现，是两束光在两个相隔不同距离的玻璃面上反射时发生所谓“干涉”的结果。当一细束光从上方入射到上面的透镜与两透镜间空气层的交界面上时，有一部分光被反射，而其余部分便进入空气层。这第二部分的光进入下面透镜的玻璃时发生反射。这两束反射光一起向上传到观察者的眼睛里。这时的情况可用图 III-14 来说明。为作图方便起见，我们分别用阴影区和白色区来代表光波的波峰和波谷。此外，为了避免重叠，光束也没有画成与分界完全垂直；实际观察的情况总是这样，因为光源与观察者的头不可能在同一直线上。在图 III-14 a 中，我们看到的是空气层的厚度等于入射光波长一半时的情形（图中波长相当于一个白色区和一个阴影区加在一起的长度）。在这种情形下，从下面透镜表面上反射回来的光波，与上面透镜上反射回来的波合成起来，使得前一波的波峰与后一波的波谷重叠，或者反过来。如果两波的强度相等，它们就会完全抵消；要不然，强度也会大大被削弱。图 III-14 b是空气层的厚度等于 $\frac{3}{4}$ 波长的情况。这时两束反射光是波峰与波峰相遇，波谷与波谷相遇，因而使强度增大。在图 III-14 c 中，空气层的厚度等于波长时，情况就和图 III-14 a 中相似。空气层更厚时，其厚度每增加 $\frac{1}{4}$ 波长，亮和暗就交替变化一次。在牛顿的实验装置情形下，空气层厚度从接触点向外连续增大，所以会看到交替出现的暗环和亮环。因为不同颜色的光对应于不同的波长，所以不同颜色的光环半径也应略有不同，这样就会看见象牛顿那样看到类似虹一样的彩色环了。应用上述牛顿所给空气层厚度的数据，我们可提出光波的波长应为 $\frac{4}{178000}$ 英寸或 0.58×10^{-4} 厘米时，

才能产生那些半径的光环。现在我们知道，它正好是黄光的波长，也是可见光光谱中最亮的部分。

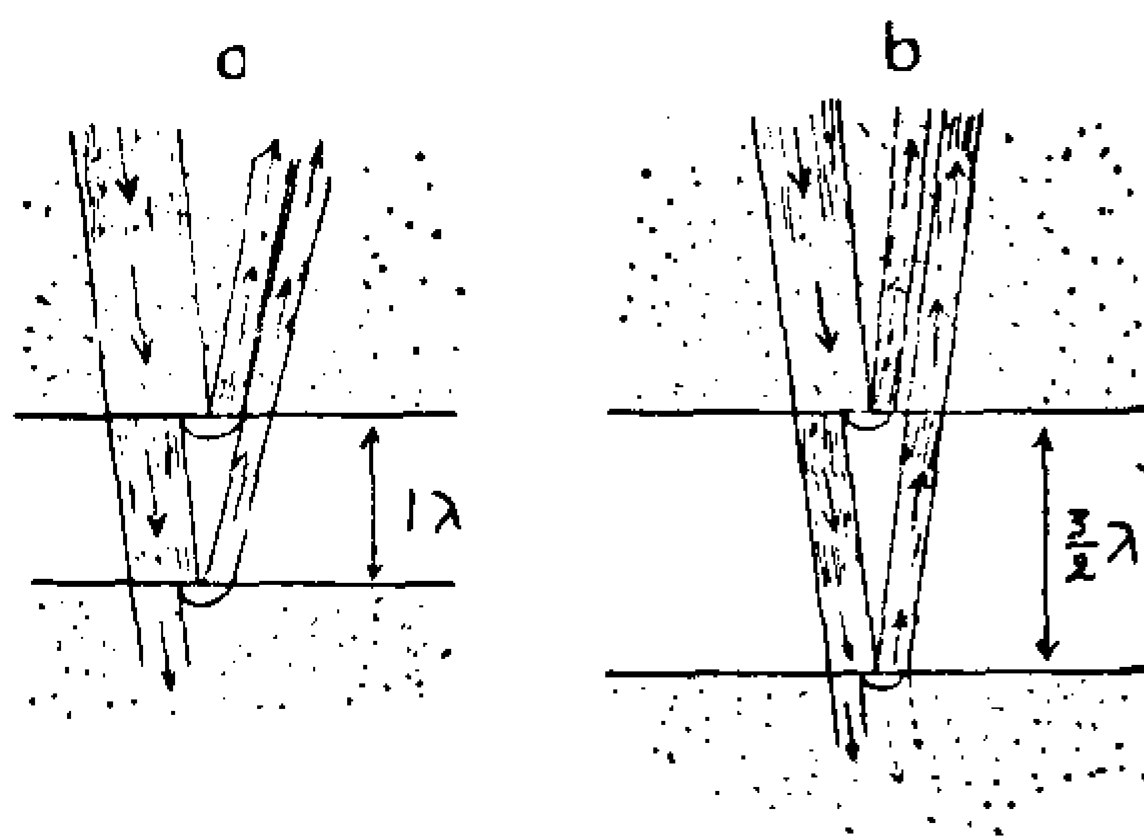


图 III-14　扬对牛顿环的解释

但是，牛顿激烈反对光的波动说，这主要是因为他不了解波动说怎样可能去解释光的直线传播。他坚持认为光一定是一束通过空间高速前进的粒子流。因此，为了解释干涉环的出现，他提出了一个"一阵容易反射一阵容易透射"的复杂理论，根据这一理论:

……每条光线在通过任何折射面时都要进入某种短暂的组态或状态，这种状态在光线行进过程中每隔一定时间又复原，并在每次复原时倾向于使光线容易透过下一个折射面，而在两次复原之间则容易被下一个折射面所反射。

牛顿这个"阵发的长度"显然就相当于我们现在所说的波长，他推断这种"阵发的长度"对于红光来说比较长，对蓝光比较短。但是，他写道:

……至于这是一种什么作用或倾向，它就是光线的圆周运动或振动，还是介质或别的什么东西的圆周运动或振动，我这里就不去探讨了。

在讨论光的本性问题上，牛顿的对手是一位比他年长十三岁的荷兰物理学家，叫克里斯琴·惠更斯，惠更斯的理论后来逐步取得了胜利。他认为把光看成是波为好，这些波通过充满整个空间的某种普遍存在的介质而传播，而不要把它看成是一束快速运动的粒子，至于他所以持这种看法的理由，他在 1690 年发表的《Traite de la lumière》一书中有一段话作了最好的总结:

论光线的直线传播

在光学中，正如在所有把几何学应用于物质的其它科学中一样，证明的程序也是以实验所导出的事实为基础的；例如光线沿直线传播、反射角等于入射角、折射时遵从正弦定则等等，这些事实现在是尽人皆知的，其可靠程度并不亚于其它事实。

在光学的各方面有所著述的绝大多数人都满足于认为这些事实是当然的，有些喜欢寻根问底的人则力图要发现它们的根源和起因，认为它们是自然界中固有的奇妙结果。然而，这里提出的观点尽管是创造性的，但也不会使得一些较有知识的人认为对一个比较令人满意的自然现象不必再作进一步的解释，所以我想在这里提出我对这个问题的想法，以尽我最大的能力，对这门学科的解答做出贡献。这门学科被认为是最困难的学科之一不是没有原因的。对那些最先起来驱散蒙罩在这些事情周围的疑云迷雾的人们，以及唤起了希望、认为它们还可以得到合理解释的人们，我是充满敬意并深为感激的。但在另一方面，我十分奇怪地发现，他们经常把一些只是很脆弱的结论看成完全可靠和已被证明了的。就我所知，还没有一个人能对光的一个最早发现而又最重要的现象提出过令人满意的解释，那就是为什么光是准确地沿着直线传播的，从无数不同方向来的光线又如何可以互不妨碍地交叉通过呢？

所以，我将在本书中试图根据当代哲学所公认的原理，对这些性质提出一些更清楚更可能的原因，首先是关于光的直线传播，其次是关于光遇到其它物体时发生的反射。然后我将解释光线在通过不同种类的透明体时遭受所谓折射的现象；其中我也要讨论由于大气密度的不同而引起的大气折射效应的问题。

接着我要研究从冰岛带来的一种特殊晶体所引起的奇特的光折射现象。最后我要讨论不同形式的透明体和反射体，利用这些物体，或者可以使光线会聚于一点，或者可以使光线以非常不同的方式发生偏转。这里我们很容易就会看到，我们的新理论不仅可以导致椭圆、双曲线和其它曲线的发现（笛卡尔曾为这个结果天才地想到了这些曲线），而且在造一个透镜时，当我们已知其一面是球形、平面或其它任何形状时，可以知道它另一面的形状如何……

根据这种哲学，现今都公认无疑：视觉只是由某种作用于我们眼后神经的物质运动所产生的印象激起的，这就促使人们以为光是由我们和发光体之

间的一种物质运动所组成的。此外，光在各个方向传播的速度非常大，而且光线确实可以来自完全不同的方向，乃至完全相反的方向，它们可以互不干扰地相互穿透。如果我们注意到这一点并予以重视，我们也许就完全了解，每当我们看到一个发光体时，光不可能是从发光体传到我们面前的物质传递，就好比象一粒子弹或一支箭在空中飞行那样，因为这与光的上述两种性质矛盾太大了，特别是与第二个性质。因此，光一定是以一种不同的方式传播的，而我们关于声音在空气中传播的知识恰好可以使我们理解这种传播方式。

我们知道，声音是借助看不见摸不着的空气向声源周围的整个空间传播的，这是一个空气粒子向下一个空气粒子逐步推进的一种运动。而因为这一运动的传播在各个方向是以相同的速度进行的，所以必定形成了球面波，它们向外越传越远，最后到达我们的耳朵。现在，光无疑也是从发光体通过某种传给媒介物质的运动而到达我们的，因为我们已经看到从发光体到达我们的光不可能是靠物体的传递来的。正如我们即将研究的，如果光在其路径上传播需要时间，那么传给物质的这种运动就一定是逐渐的，象声音一样，它也一定是以球面或波的形式来传播的；我们把它们称为波，是因为它们类似于我们把石头扔入水中时所看到的水波，我们能看到水波好象在一圈圈逐渐向外传播出去，虽然水波的形成是由于其它原因，并且只在平面上形成……

惠更斯考虑了在水面上、空气中或神秘的“宇宙以太”即光波的载体中波的传播之后，便把他的论证建立在一个简单原理的基础上，我们今天已用他的名字命名这个原理。还是用那个最常见的明显例子，假定我们把一块石头扔入池塘的平静水面上，我们就看到一圈圈水波，或者更确切地说，看到一个波列在石头投入水面的地点周围传播出去。若给定波在某一时刻的位置，我们怎样求出它在此后一个短间的位置呢？根据惠更斯原理，传播中波前上的每一点，都可以看成是一个新的波或子波的波源，新的波前位置就是这些小子波的包络线，这些子波是从原先波前上所有的点发出的。这点可用图 III-15 来说明，图中表示圆形波和平面波两

种最简单的情况。

惠更斯原理最光辉的应用，是他对光的折射的解释，如图III-16所示。假定一平面波前从左上方落到空气与玻璃（或任何别的两种介质)的界面上。当这列波的波前是在 aa' 的位置时，它与界面在 a 点相遇，从该点便发出一球面子波传入玻璃中。随着波前在空气中继续前进，从 b 点，c 点等等将依次发出其它子波。图中相当于前进着的波前到达 dd' 位置的情况，这时从 d 点刚刚正发出玻璃中的子波。为了找到玻璃中波前的位置，我们要作出所有子波的包络线，在此情形下，它将是一条直线。如果象图中所假定的那样，认为光在玻璃中的速度小于在空气中的速度(就是玻璃中球面子波的半径小于空气中相邻波前之间的距离)，那么玻璃中的波前就会向下倾斜，折射光就比入射光更接近垂直线了；这正是光从空气进入玻璃时实际发生的情形。要是玻璃中的光速比空气中大，就会发生相反的情况。为了求出入射角 i 与折射角 r 之间的关系*，可考虑两个有公共斜边的直角三角形 bde 和 bdf。根据正弦函数的定义：

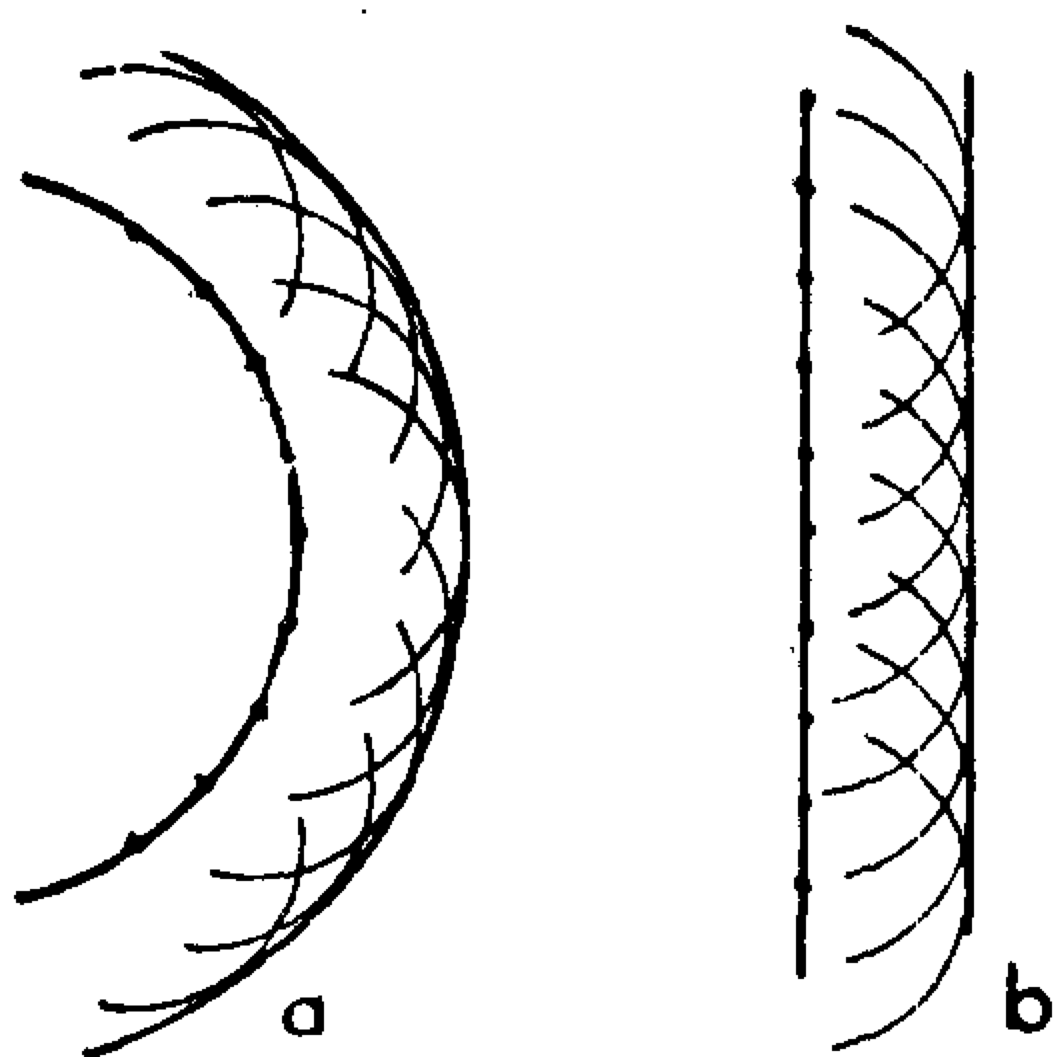


图 III-15 波传播的惠更斯原理

$$\sin i=\frac{ed}{bd};\qquad \sin r=\frac{bf}{bd}$$

第一式除以第二式，便得

* 这两个角可以定义为光线方向与两介质界面的垂线之间的夹角，也可以定义为波前与这界面之间的夹角。

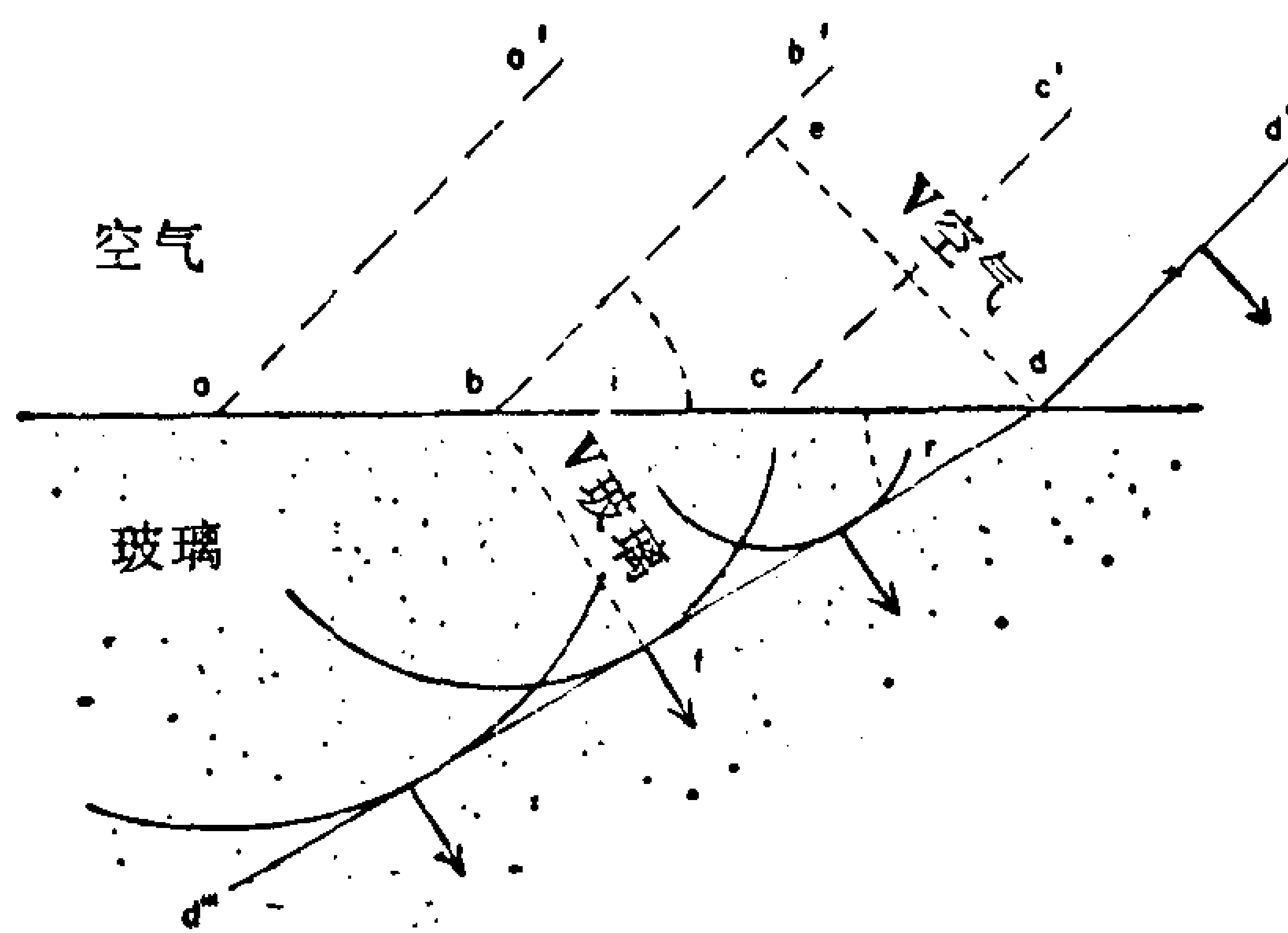


图 III-16　惠更斯对光折射的解释

$$\frac{\sin i}{\sin r}=\frac{ed}{bf}=\frac{V_{空气}}{V_{玻璃}}$$

式中 $V_{空气}$ 和 $V_{玻璃}$ 是光在这两种介质中的速度。这正好是修正后的斯奈尔定律，即这两个正弦函数之比（称为折射率）等于两种介质中的光速之比。因此，稠密介质（如玻璃）中的光的速度小于稀疏介质(如空气)中的光的速度。

值得指出的是，牛顿关于光的微粒说会使我们得出恰好相反的结论。事实上，要在微粒说的基础上解释光线从空气进入玻璃时的弯曲，就需要假设光线在通过界面时，有一种垂直于界面的力把光粒子拉进玻璃里去。在这种情况下，玻璃中光的速度当然就会比空气中大了。

光的波动说的胜利

虽然惠更斯关于光的波动说比牛顿的微粒说有着明显的优点，但是它在很长时期内都得不到承认。其部分原因是由于牛顿

在他的同辈人中有着很大的权威，特别是因为惠更斯未能用足够的数学严密性来发展他的观点，使之无懈可击。这样，关于光的本性问题就一直被搁置了一个世纪之久，直到1800年英国物理学家扬氏发表了一篇论文，题目是"关于声音和光的实验和探讨提纲"，问题才得到解决。扬氏在这篇文章中根据光的波动本性解释了牛顿环的现象，并描述了他自己的实验，实验可以用比较简单的方法表现出两束光的干涉。在这个实验中（图III-17），他用一个屏幕遮住暗房的窗子，屏上有两个靠得很近的小孔。当这两个孔较大时，穿过它们的阳光就在置于一定距离远的另一屏幕上形成两个光斑。但当孔很小时，穿过它们的光束是按惠更斯原理散播出去的，这两个光斑也就扩展开来，而彼此部分重叠。在屏的可以受到来自两个孔的光照射的区域，扬观察到了一系列由暗条隔开的彩虹般美丽的条纹，与牛顿环十分相似。当屏上小孔相距一毫米，另一屏在一米远时，条纹约有0.6毫米宽。对这个现象的解释就象牛顿环的情况一样，要依据光波的干涉。屏上a点的位置正好是在两个像的中间，到O'和O的距离相等，所以到达这里的光波是

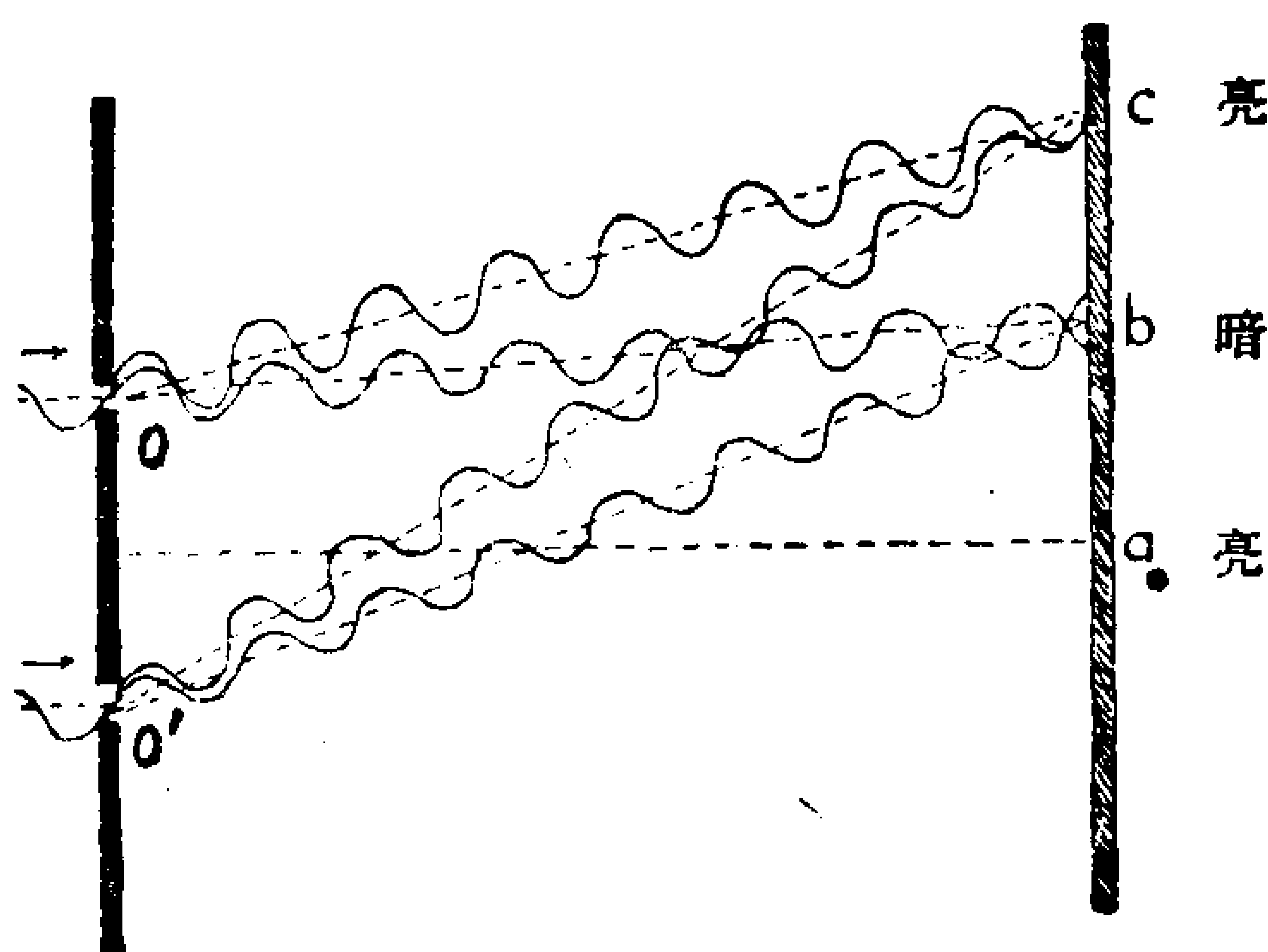


图 III-17 扬氏干涉实验

"同相"的,即波峰对波峰,波谷对波谷,两个波的运动相加起来,使亮度增强。对于 c 点,它到 O 和 O' 的距离相差一个波长,情况也是如此。但在 b 点和 d 点,$bO-bO'$ 和 $dO-dO'$ 分别相差 $\frac{1}{2}$ 个波长和 $1\frac{1}{2}$ 个波长,到达的光波就是"反相"的了,波峰与波谷重叠,我们在这里就看到暗条。

扬氏和他的同时代伟人法国的菲涅耳的工作牢固地确立了光的波动说的正确性,所以惠更斯在与牛顿的终身争论中,终于在死后取得了胜利。

一块来自冰岛的晶体

牛顿和惠更斯两人纠缠不清的另一个问题,是光的偏振问题。丹麦哲学家巴托林在 1669 年发现,有一种透明的矿物晶体,称为冰洲石,具有一种特殊的性质。当光线沿一定方向穿过它时,它能把光线分裂为独立的两束光(照片I,下)。如果绕着入射光的方向转动这块晶体,它发出的这两束光中有一束称为寻常光的,将保持稳定不变,另一束称为非常光的,要随着晶体的转动而转动。惠更斯对这个现象的解释是假设光波进入冰洲石晶体(以及其它某种晶体)后分裂成两列波:一列波在各个方向都以相同速度在晶体中传播,而另一列波的速度与它相对于晶轴的方向有关。至于传播速度的这一差别何以能形成两束光,惠更斯的想法如图 III-18 所示,它当然还是以惠更斯原理为基础的。当光束垂直地落到冰洲石晶体的表面上时,就形成两列子波,一是球面波,另一列是椭球面波。球面子波构成的是一个沿原来的入射方向继续前进的波前,而椭球面子波产生的波前要不断地偏向一旁,因而形成了非常光。两束光穿出晶体后,在空气中只形成球面波,所以两束光变成

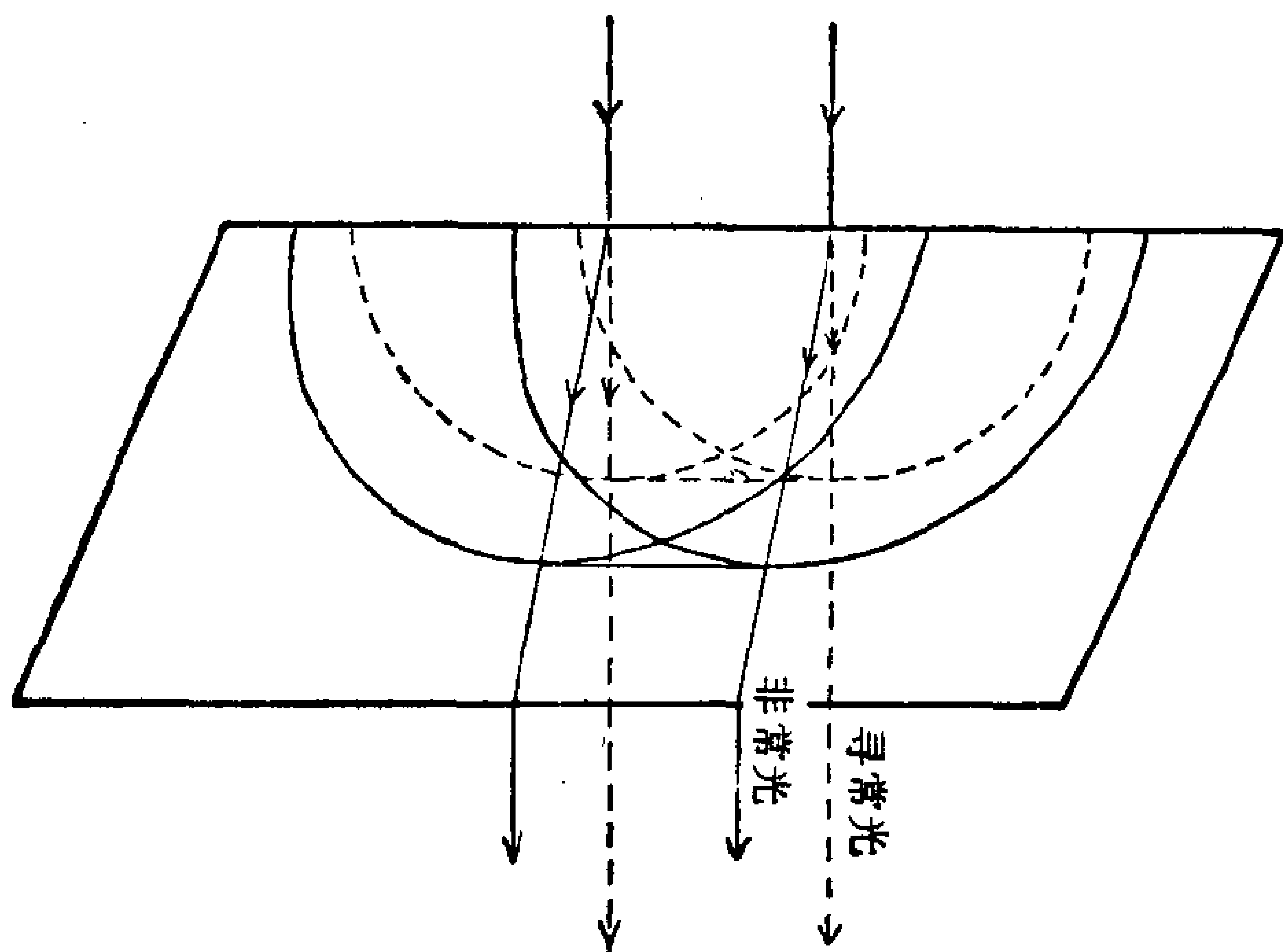


图 III-18 惠更斯对双折射现象的解释

平面的了。惠更斯所作的这个解释虽然是完全正确的，但他无法解释为什么光波在晶体中有两种不同的传播方式。这是因为惠更斯以为光波中振动也象声音的情况那样是沿着其传播方向发生的(纵向振动)，在这种情况下，如果绕着入射光束方向转动晶体就根本不应当有什么不同。另一方面，牛顿并不相信惠更斯的波和子波，他企图用如下的假设来解释这个现象(称为"双折射")：构成寻常光和非常光的粒子在垂直于光线的方向上有着不同的指向。在《光学》一书的第二版中，牛顿把这两束光线之间的区别比做两根长棒之间的区别，其中一根棒的截面是圆形的，另一根是矩形的。如果绕着其轴线转动第一根棒，就看不出会有什么差别，第二根棒的情况就肯定不一样了。牛顿写道："所以，每条光线都有一对侧面，原来就具有与非常折射有关的性质，而另一对侧面则不具有这种性质。"

牛顿显然认识到光线一定具有某些横向的（即垂直于传播方

向的)性质，但他未能具体看出这可能是些什么性质。

直到很久以后，由于法国物理学家马吕斯(1775—1812)和其它人的努力，惠更斯和牛顿关于这个问题的想法才被归纳成一个统一的观点。毫无疑问，光无非就是在空间中传播的波，但介质的振动不是象惠更斯所想象的那样发生在传播方向上，而是发生在垂直于它的方向上。冰洲石中寻常光与非常光的区别就在于，寻常光的振动发生在光线和晶轴所共的平面内，而非常光的振动垂直于它。

光振动横向性的发现曾使后代的物理学家头痛万分。事实上，横向振动只可能在固体中存在，因为只有固体具有抗切变和抗弯曲的能力。这就意味着宇宙以太这种假想的传播光的介质并不是象惠更斯所设想的那样是一种很稀薄的气体，而是固体！如果能被贯穿的以太是固体，行星和其它天体又怎样能在其中运动而实际上毫无阻力呢？而且，即使我们假设宇宙以太是一种很轻而又容易变形的固体物质，象今天在粘连时所用的海绵胶一样，天体的运动也会在其中钻出许多沟槽，以致它很快就会丧失它能长距离地运载波的性能了！这个头痛的问题折磨了好几代的物理学家，直到爱因斯坦把以太扔出物理学教室的窗外，才最后解决了它。

牛顿的光辉失色了

牛顿在 50 岁的时候，决定抛弃学术生活，开始寻找一个能给他带来更多收入的职位。有人推荐他去担任伦敦的查特蒙斯公立学校*的校长，但他认为这个职位还不够高。他在谢绝这件事的一封信中写道：

* 一所英国贵族的上流学校。

我感谢你们让我去当查特蒙斯的校长，但我看不出那里有什么值得去争取的：除了一辆我并不怎么向往的马车外（显然这是应当给校长配备的），每年不过是200镑，还得整天关在伦敦不出去，这种生活方式我并不喜欢；我也不认为参与这一竞争是适宜的，仿佛那是个什么肥缺似的。

1696年，牛顿54岁的时候，先被任命为伦敦造币厂的知事，后又成为经理，他开始真心实意地挣钱了。1705年，他被授予爵士称号，成为艾萨克爵士，还获得了许多其它荣誉。但是，在他一生的最后二十五年(他逝世于1727年，时年85岁)，没有任何重要的发现，而在他25岁时，这些发现简直象神话中的富饶角一样泉涌如注。他的一些传记作者说，这是因为他老迈龙钟了，有些则说是因为他已经耗尽了他那个时代所能产生的全部思想。不管怎么说，他做得是够多的了！

第四章　热是能量

最早研究热现象的是史前穴居的男人，他们学会了在太阳不能供给足够的热时怎样生火取暖。他们的亲密合作者，史前穴居的妇女，完成了另一个重要发现——把各种食物在火上或开水里放一段时间滋味就好得多，也容易消化些。“热”和“冷”的观念是人生来就有的，也是所有其它生物生来就有的，周围介质的温度通过皮肤表面上无数的神经末梢将信号传入并印记在大脑里。但是，对温度的生理反应常常会给人以错误印象，一个盲人就说不出他的手是被烧红的铁烫伤的，还是被一块干冰冻坏的。这两种情况下的感觉是一样的，因为它们都只是组织受伤的生理反应。

温　度　计

测量温度的第一个真正的科学仪器是伽利略在1592年发明的，他用了一只颈部极细的玻璃长颈瓶来测量温度。瓶中装了一半有颜色的水，并把它倒过来放在碗里，碗里也有带颜色的水。随着温度的变化，瓶泡中所包含的空气会膨胀或收缩，颈中的水柱就会上下运动。伽利略没有考虑到引进任何温度刻度，所以他这个装置应当叫做“温度指示器”，而不是“温度计”。1631年瑞艾对伽利略的温度指示器提出了改进；修改过的仪器只是把伽利略的长颈瓶倒过来，用水的膨胀来表示冷热。

图斯坎纳*的一位对科学感到兴趣的公爵，名叫斐迪南，在

* 译注：Tuscany 意大利中西部地名。

1635年用酒精(其冰点温度比水低)制成了一支温度计，他把管顶封起来，以免酒精蒸发。最后，在1640年，意大利林赛大学的科学家们制成了现代温度计的雏型，他们是用水银，并且至少是部分地把封了口的管子上部的空气抽去了。值得指出的是，这整个发展过程几乎花了半个世纪的时间，比较起来说，电磁波的发现到制成第一部无线电报机之间，镭裂变的发现到制成第一颗原子弹之间，都只经过了几年功夫。

气 体 定 律

当牛顿在剑桥钻研光和重力的时候，另一位英国人罗伯特·波意耳正在牛津研究空气和其它气体的力学性质和可压缩性。当波意耳听到了卡瑞克发明空气泵的详细情况后，他就大大改进了泵的设计，并开始一系列的实验，来测量空气在各种低压和高压下的体积。这项工作的成果，就是现在所说的"波意耳定律"，这个定律说，一定量的任何气体，在一定的温度下的体积与其所受的压强成反比(图 IV-1)。

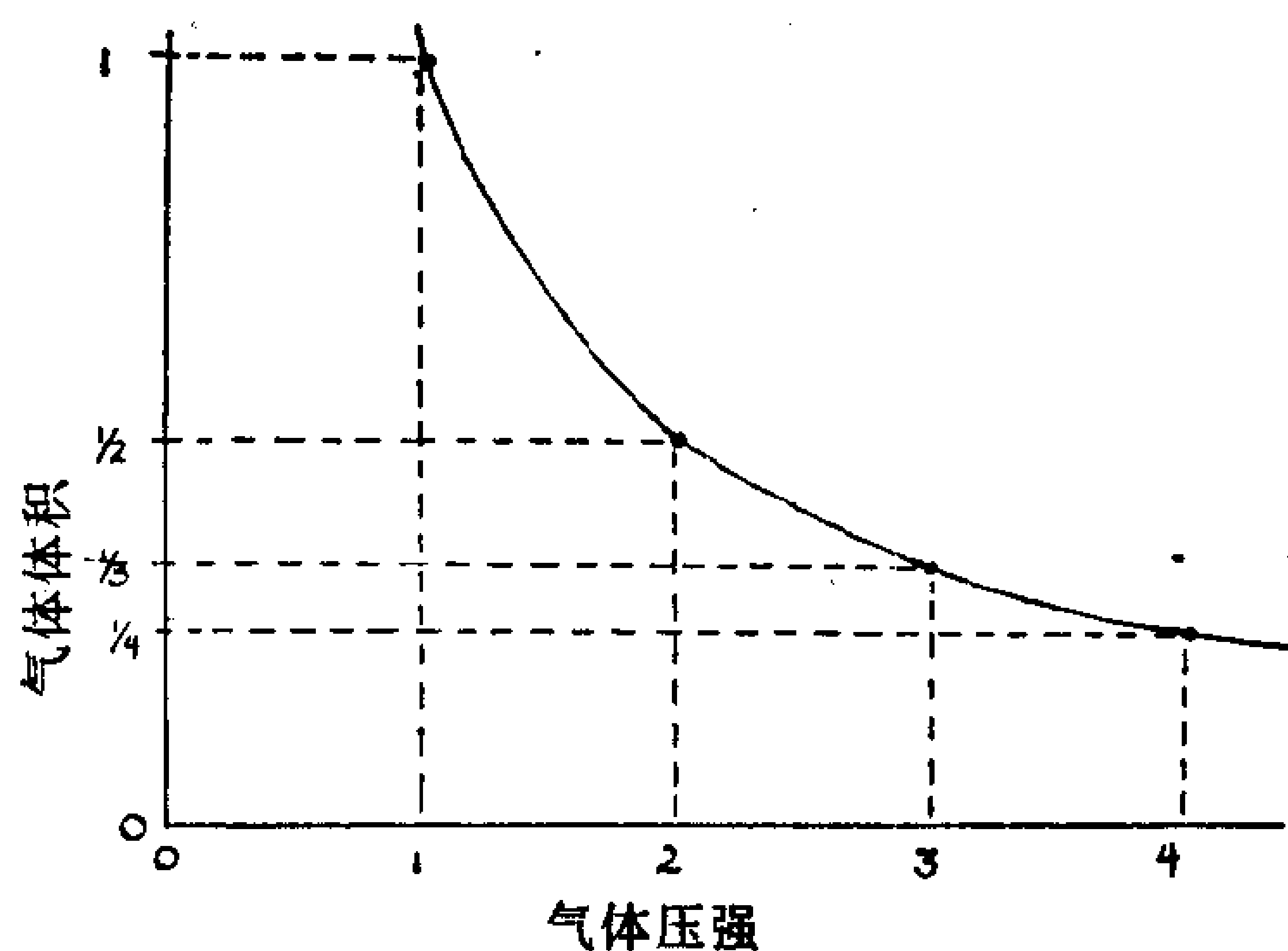


图 IV-1 气体体积与气体压强成反比的波意耳定律的图示。

几乎一世纪以后，法国人盖·吕萨克研究受热膨胀时，发现了另一个重要定律，即对于一定体积中所包含的任何气体，当温度每升高一度(摄氏)时，它的压强便增加其原来数值的 $\frac{1}{273}$。另一

位法国人查理在此两年前也发现了同样的定律，因此常称它为"查理定律"。

气体温度计和绝对温度

这两条定律突出说明了气体内部结构的简单性，因为液体和固体的可压缩性和热膨胀所遵从的定律是比较复杂的，与物质的本性有着根本的联系。气体的行为所遵从的这两条定律的简单性却与其化学性质无关，这就使得伽利略所制成的气体"温度指示器"在测量温度时比后来造成的任何其它测温装置要合理得多了。各种不同的液体，如水、酒精、水银等等(以及也能用来制造温度计的固体)，随着温度的升高其膨胀方式是稍有不同的；对于水来说，当温度从冰点上升几度时，甚至要收缩而不是膨胀。因此，如果我们用不同的液体制成两个温度计，在两个不同的温度下(例如水的冰点和沸点)，给它们液面的位置做上标记，把这两个标记之间的距离分为相等数目的间隔(在摄氏温标下是分为100°)，那么，这两个温度计在两端点中间所指示的温度数值就会稍有不同。但是，因为所有的气体受热时膨胀的方式完全一样，所以用它们来做测温物质就更标准得多了。如果象伽利略那样使用气体温度计，我们就不必声明所用的气体是普通的空气、氢气、氦气还是别的什么气体。气体温度计的现代形式如图IV-2所示，其原理是测量受热气体的压强而不是体积。当温度升高时，气体便膨胀，而把左边玻璃管中的水银向下压。若抬高右边的玻璃管，使气体恢复到原来的体积，则由两个水银面之间的温度差 h 就可以测出温度。在气体温度计的基础上确定了温标之后，我们就可以用气体温度计作为标准，来对所有其它的温度计进行刻度。如果使用气体温度计，并以大气压强为起点计算（这时玻璃管中两水银柱处在同一水平面

上),则如上所述,我们发现每当气体的温度升高或降低1℃时,其压强将增加或减少它原来数值的 $\frac{1}{273}$。因此,如果我们从0℃(水的冰点)开始,把气体冷却到零下273°,气体的压强就预期要降到零,气体的体积也要被压缩到零(图IV-3)。我们所料想的这一点,称为**温度的绝对零度**,而从该点算起的温度,则称为绝对温度(即绝对温度T度=273+T℃)。冷却的气体当然不会坍缩到没有任何体积的数学上的一点,它们在达到绝对零度之前不久就凝成液体了,而液体是不能再压缩多少的。但是,温度的绝对零点在热学中还是起着很重要的作用,因为这时如果假设气体分子的大小是无限小并且分子间没有引力

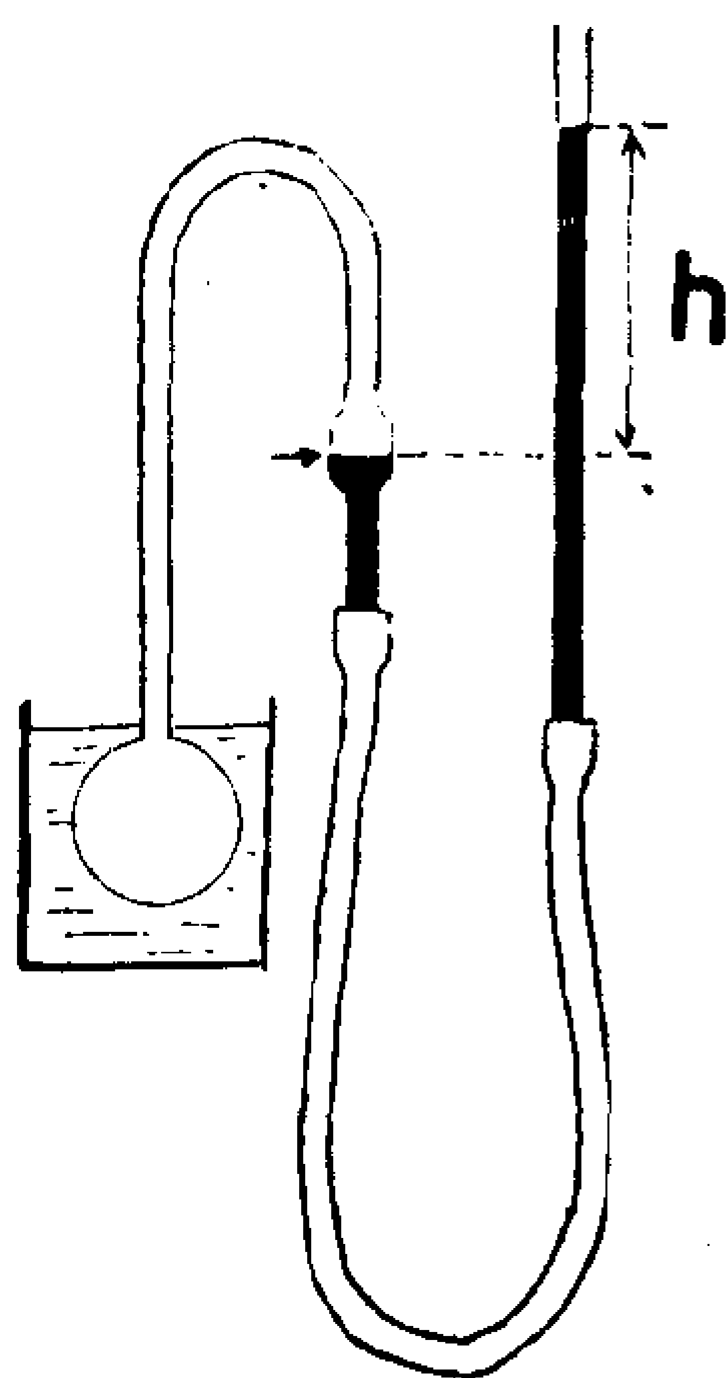


图 IV-2 气体温度计的原理。左边容器中气体的温度越高,右边可移动的管子中水银柱的高度 h 一定越高,才能使中间管子中的水银面保持在箭头所指的原来位置上。

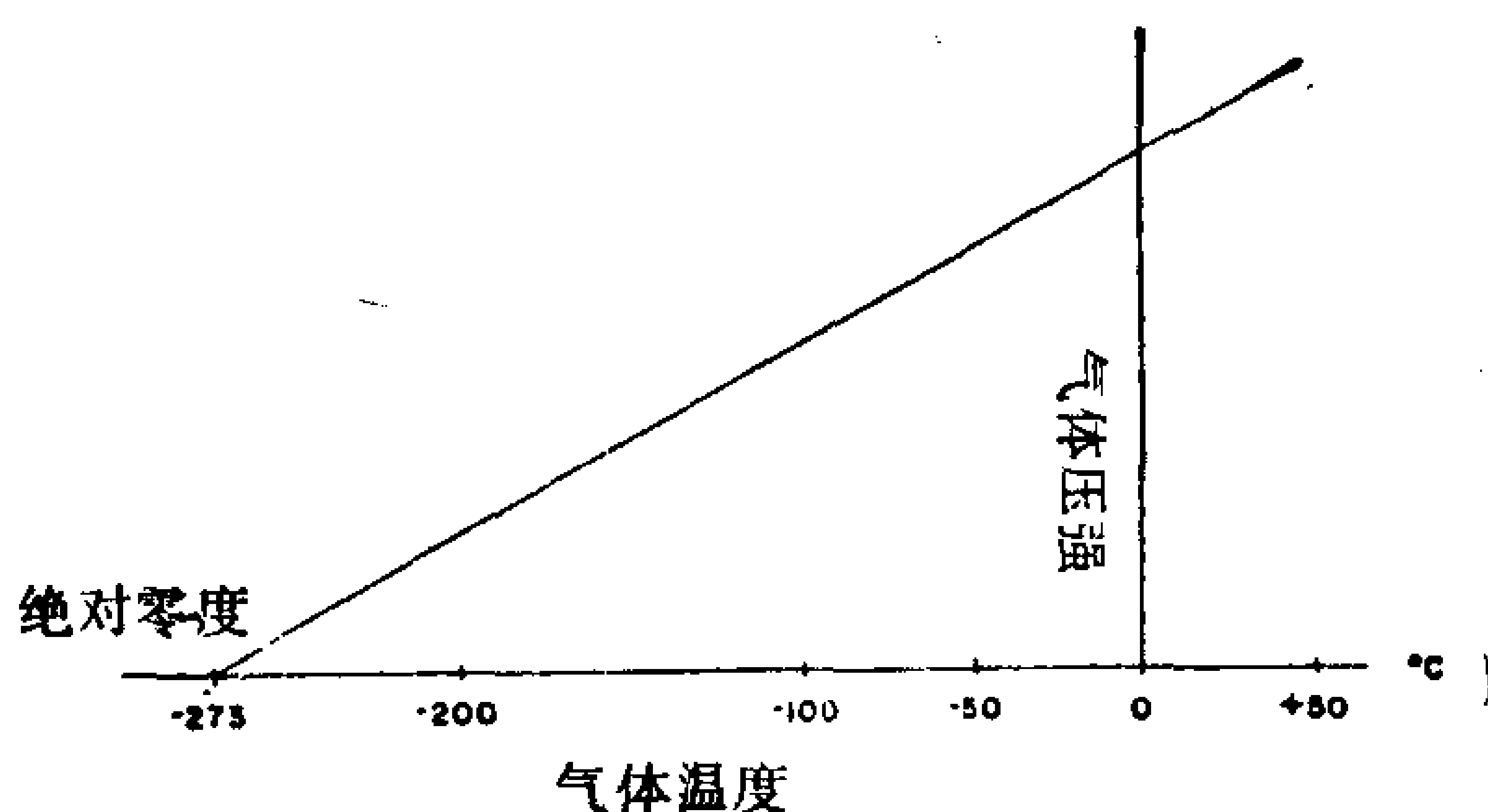


图 IV-3 一定体积中所包含气体的压强与温度依赖关系的图示。在水的冰点以下273℃时,气体的压强变为零。

的话，气体就会坍缩到数学上的一个点（这两个条件对于氦、氖、氩这类“稀有气体”是很接近于满足的）。

热　流　体

虽然人们从上古以来就已谈论热——人们说，南方太热而北方不太热——但是第一个把热说成是一种确定的实体，并且可以象对水和煤油那样去测量它们的量的人，大概是一位名叫詹姆士·布莱克的苏格兰物理学家（1728—1799），他对物理和化学都有兴趣。他把热设想为一种没有重量的流体，并称之为“热素”，它可以渗透一切物体中，使它们的温度升高。他把一加仑开水和一加仑冰冷的水混合起来，并指出道，我们发现这混合物的温度正好是原来温度的一半。他对这个事实的解释是：混合后热水中多余的“热素”正好在两部分水之间平分了。他把热的单位定义为一磅的水温度升高1°F时所需要的热量（在现代的米制中，我们是用卡，它是一克的水温度升高1℃时所需要的热量）。他推断说，相同重量的不同物质被加热到相同温度时，所含有的“热素”的量是不同的，因为把相同重量的热水和冷水银混合起来，我们得到的温度确实是更接近于水而不是水银的温度。因此他认为，一定量的水冷却一度时所释放的热量要比把同样重量的水银加热一度时所需要的热量多些。这使他导出了不同物质的热容量的概念，它表示把物质的温度升高一度所需的热量。布莱克引用的另一个重要概念是潜热，它是把一块冰变为冰水（两者都是0℃）或把开水变为水蒸汽（两者都是100℃）时所需要的热量。他认为把一定数量的无重量的热素加到一块冰里时，就会使它的结构松散，使之成为液体。同样，热水中再加热素时会进一步使其结构松散而变成蒸汽。

热与流体相似的观念，得到了年轻的法国人卡诺（图IV-4）的

进一步发展，卡诺在1832年36岁时就死去了。他曾把蒸汽机与水车做了比较，蒸汽机是靠锅炉中流出的热做机械功的，而在水车中，是靠水从高处下落做功的。这个类比使他得到一个结论：正象一定量的水所做的功与水车上下的水位差成正比的水车情况一样，蒸汽机所能产生的机械功也一定与产生蒸汽的锅炉及其冷凝器之间的温度差成正比。然而，他以为蒸汽机和水车的情况完全一样，进入冷凝器中的热量等于从锅炉中取出的热量，它之所以能做机械功是因为一定量的热从高温区"落"到了低温区。我们现在知道这个想法是错误的，蒸汽机把经过它的一部分热能转化成了机械能，进入冷凝器的热量，由于这一部分转化的热量而变少了。

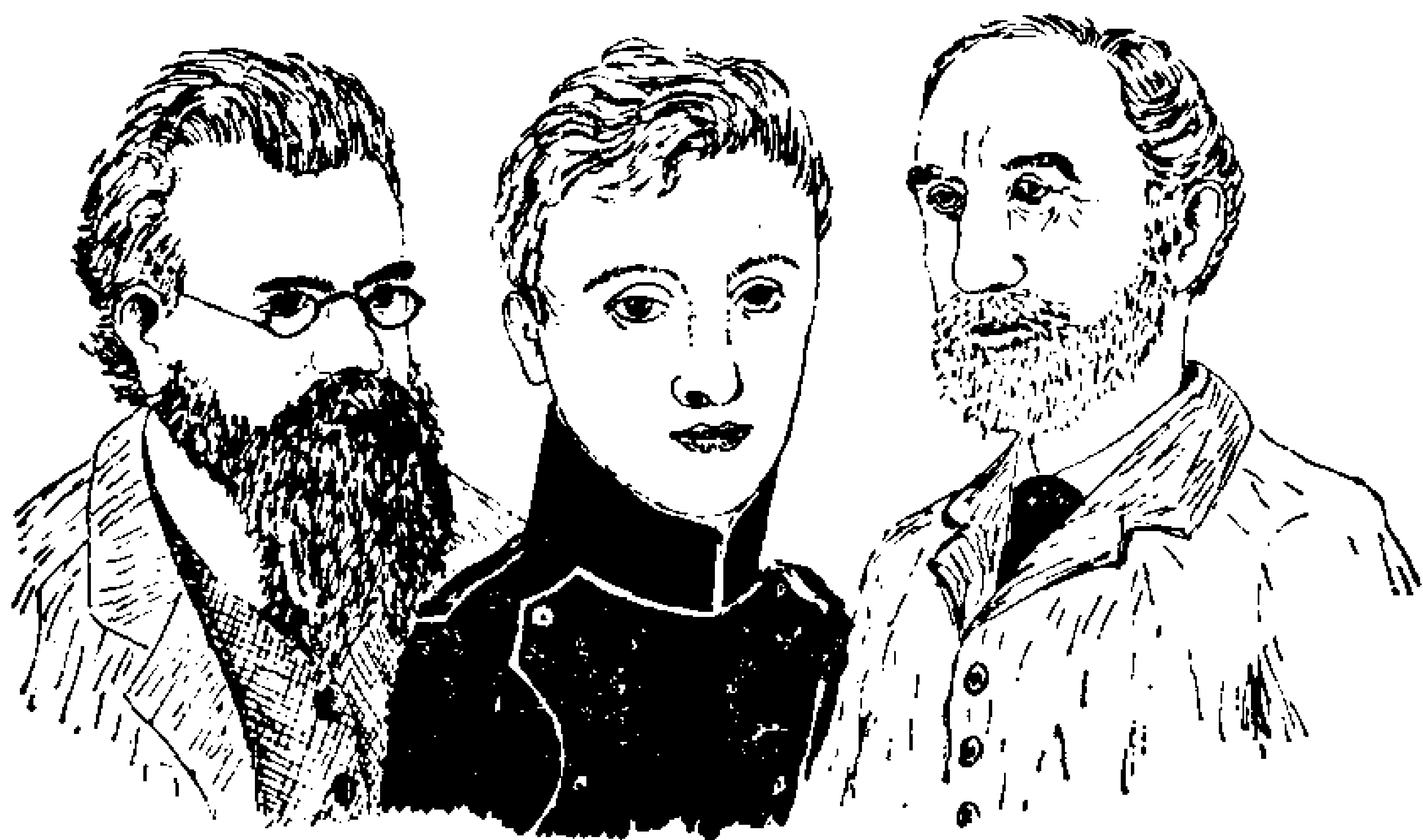


图 IV-4 现代热学理论的奠基者玻尔兹曼(左)、卡诺(中)和吉布斯(右)。

热是运动

热是物体的某种内部运动而不是象布莱克等人所想象的那样是一种特殊的实体，这个观念首先是由一位职业士兵提出来，并且在一家枪炮工厂中得到了实验证明。本杰明·汤姆逊生于马萨诸塞州，在年轻时参加过独立战争。后来他改入英国国籍，很快就成为殖民事务大臣的次官。以后他又到德国巴伐利亚当陆军部长，

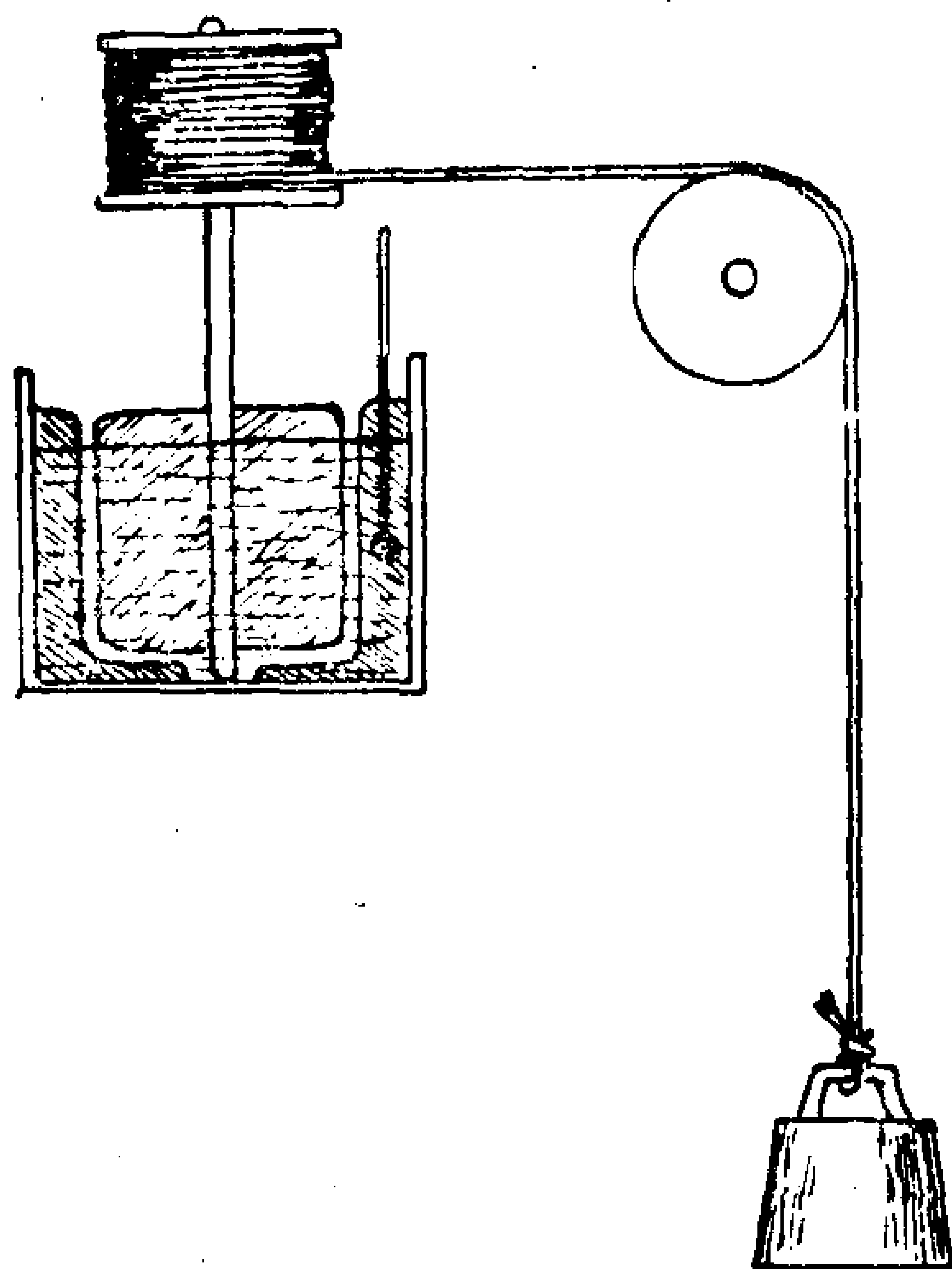
并因重组德国军队而获得朗福德伯爵的爵位。除所有这些军事活动外，他还对科学问题深深感到兴趣，特别是关于热的本质问题。他不满足于当时流行的观点，即认为热是某种实体，与所有其它的化学性质没有什么不同，它与冰结合起来可以产生水（冰＋热＝水），也可以在各种燃烧过程中被释放出来。汤姆逊怀疑这种看法的理由是，热事实上可以在摩擦过程中“从无生有”，而摩擦过程与化学转变显然毫无关系。他在慕尼黑兵工厂视察炮筒钻孔时，很奇怪铸件为什么变得这么热，特别是钻头变钝的时候。他考虑有这样一种可能：物体在成大块时也许要比它们被破碎成小碎片时具有更大的热流体容量，这样就可以解释为什么在钻炮孔产生大量金属钻屑时会放出热了。他仔细测量了固体金属块和相等重量的金属钻屑的热容量，发现它们是完全一样的。他设法将热物体的重量与其冷却时的重量做了比较，企图求出失去的热流体重量，但是得到了否定的结果。

根据他在《伦敦哲学学报》(1799)发表的一篇文章中所给的数据，一卡的热不可能重于 0.000013 毫克。我们现在知道任何形式的能量都具有可以测量的质量，根据著名的爱因斯坦（质能）关系，该质量等于能量除以光速的平方。一卡热的重量实际上等于 0.00000000004 毫克，这是任何测量的精度完全达不到的。这一切使他得出结论说，热不可能是一种实体，而一定是某种运动。他写道：“什么是热？它不可能是物质的实体，对我来说，热除了是那种在这个实验（给大炮钻孔）中当热出现时就不断传给金属屑的东西即运动以外，似乎难以设想它是别的什么东西。”

热的机械功当量

几十年后，一位德国医生梅耶在他 1842 年发表论文“评论无

生物界中的力”中进一步发展了朗福德伯爵的思想。梅耶在一家纸厂设计了一个实验，纸厂里的大锅里所装的纸浆是用机械搅拌的，靠绕着圈子的马作为动力。他测出纸浆温度的升高，就可得到马做了一定量的机械功所产生的热量的数据。但是，由于医务繁忙，他从来没有做出过比较精确的实验而沿着这条路线继续走下去，所以精确地测定热的机械功当量的荣誉还得归于英国人焦耳。焦耳在他的实验中使用了一种如图IV-5所示的装置，由一只装上了一个转动轴的容器以及附在轴上的几个搅拌桨所组成，容器中装满了水。容器中的水由于容器壁上装有特殊的叶片使得内摩擦增加，因而不能随着搅拌桨一起自由地转动。装着搅拌桨的转动轴通过一个滑轮由一吊着的重物所驱动，这重物下降所做的功便转化为摩擦热传给了水。如果知道容器中的水量并测出温度的升高，焦耳就能算出由此产生的总热量。另一方面，这重物的重量与它下降的距离之乘积，给出了机械功的数值。在不同的条件下多次重复了这个实验后，焦耳便确定了重物所做的功与产生的热之间成正比关系。1843年，他在发表这一研



图IV-5 焦耳把机械能转化为热的实验，下降的重物使装满水的容器中的搅拌桨转动，水温便由于内部摩擦而升高。把下降的重物所做的功与水中所含热量的增加进行比较，焦耳便得出了热的机械功当量。

究结果时写道:"一磅重的物体在曼彻斯特下降778英尺的距离所做的功,如果使之通过水的摩擦产生热的话,则可使一磅重的水温度升高华氏一度。"这就是我们今天要把热能转化为机械能或把机械能转化为热能时所普遍采用的数字，只是被表示成了各种单位而已。

热　力　学

在热和机械能的等价性(今天称之为热力学第一定律)被牢固地确立后，就该把卡诺关于能量从一种形式转化为另一种形式的规律这一工作加以发展了。这方面开拓性的工作是上个世纪后半期由德国物理学家克劳修斯和英国物理学家开尔文完成的。我们从日常经验知道：热总是从较热物体流向较冷物体的，决不会反方向流过去。我们又知道，机械能可以完全转化为热，例如利用摩擦，但是，热完全转化为机械能在物理上说就

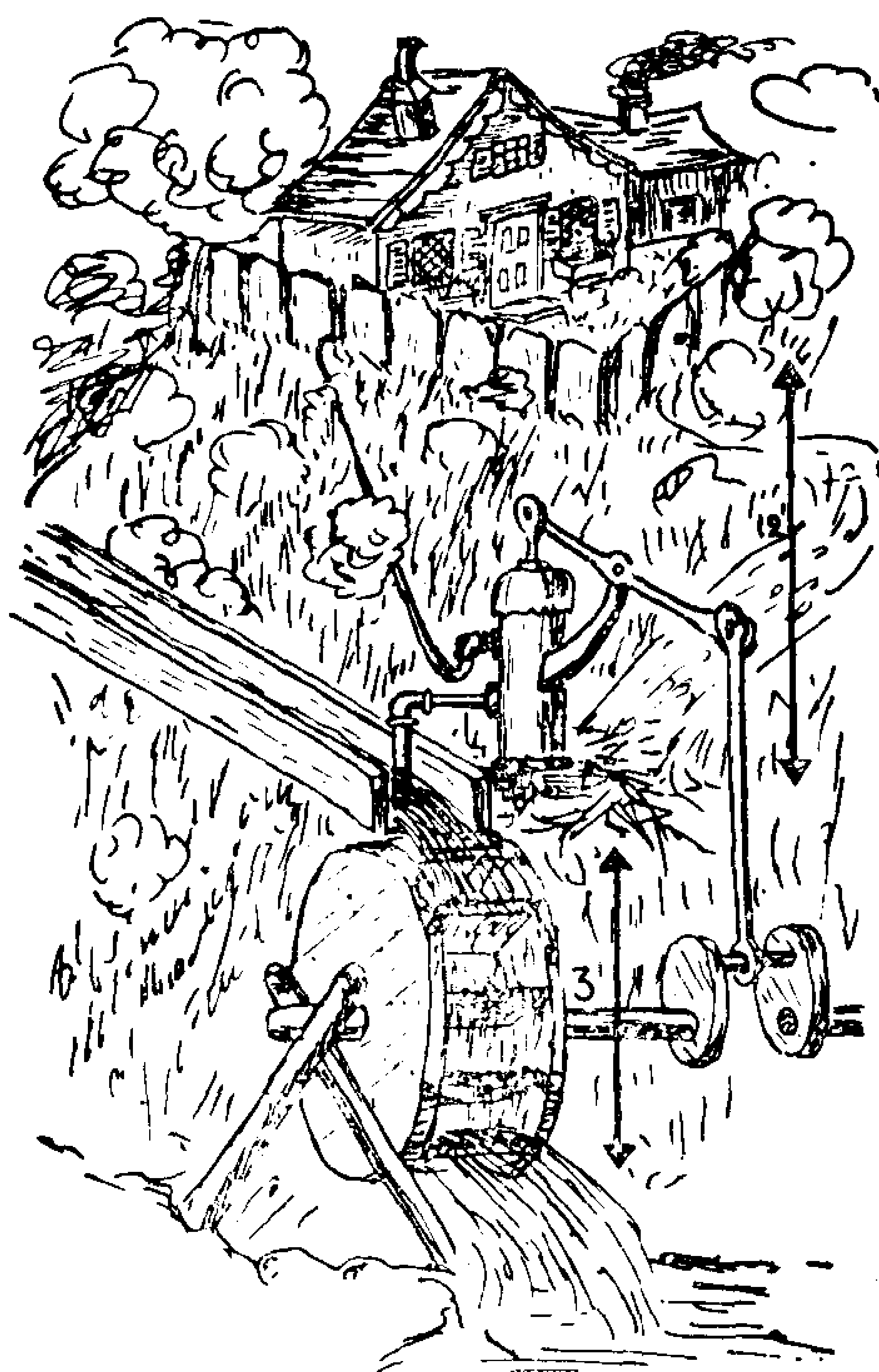


图 IV-6　热机的水力学类比，热机把一部分从高温区流向低温区的热转变为机械能。

是不可能的了。实际上，卡诺已经了解，机械功的产生是与高温到低温时“降下”的一定量的热有联系的。但是，卡诺误以为热是原封不动地从锅炉传到冷凝器的，而热力学第一定律说，其中有一部分失去了，其当量表现为蒸气机所做的功。这种情况好比山坡上的住户从山下小河里引水来用。居民们决定不用电动机带动水泵，而改用一部水车推动它，水车就用这条河的河水作为动力，如图 IV-6 所示。这样，在有一部分河水降下来使水车转动的时候，另一部分河水被泵到山上的住户里去了。显然，我们不可能把河里的水全部都泵上山去，因为这样就会没有水来开动水泵了。下降的水所提供的功或者把它升高所需要的功都等于水的重量乘以高度，所以我们所能做出的最好的安排就是，河里下降的水刚好足以把其余的水都泵到山上去。比如说，水坝的高度若是 3 英尺，用户位置比水泵高 12 英尺，如用 x 表示泵到住宅中去的水的比率，则有

$$12x=3(1-x)$$

由此得到

$$x=\frac{3}{12+3}=\frac{1}{5}$$

因此，这一装置抽到山上的水不可能多于总水量的 1/5。以后我们将看到，在热从热区流向冷区时，只能部分地转变为机械能，能够转变为机械能的这部分热所占的比率是 $\frac{T_1-T_2}{T_1}$，这里 T_1 和 T_2 分别是发热器和冷却器的绝对温度。沸水的温度是 100℃ 或 373K，如果冷却器用冰冷却，则其温度是 0℃ 或 273K。这样，蒸汽机的最高效率便是 100/373＝26%。实际上，因为热量的损失和其它实际原因，蒸汽机的效率还要更低些。

如果没有附加的热从热处向冷处“降下”，就不可能把热转化为机械能，这个说法称为“热力学第二定律”。它与下述说法是等价

的：热不会自动从冷处流向热处。的确，假如我们能够使热自动从冷却器流向发热器的话，热就会循环往复，蒸汽机不用任何燃料就会自行运转了。水全部自动流上山，而后又冲下来推动水车的轮子，也属于这类机械设计！

在热力学的数学处理中，引入了“熵”的概念，它常被记为“S”，定义是物体所得到或失去的热量除以物体的（绝对）温度。应用熵的概念又可将上述热力学第二定律表述如下：任何孤立系统（即与周围环境没有任何热交换或机械相互作用的系统）的熵只能增加或保持不变。如果把一块冰放在热水杯中，热会不会从冰块流到水里，使这块冰远低于零度，而把水加热到沸点呢？根据热力学第二定律这是不能发生的，因为那就相当于冰块和水这个系统的熵减少了。

实际上，设 T_1 是热水的温度，T_2 是冰块的温度，于是 $T_1>T_2$。假定一定量的热量 Q 会自发地从冰块流入它周围的热水中，水所得到的热量就是 $+Q$，其熵的变化是 $\Delta S_1=+\frac{Q}{T_1}$。冰块因为是损失热量，故其所得到的热量应是 $-Q$，于是冰块熵的变化是 $\Delta S_2=-\frac{Q}{T_2}$。这样，水和冰块这个系统总的熵变化应为 $\Delta S_1+\Delta S_2=\frac{Q}{T_1}-\frac{Q}{T_2}=Q\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)$。因为 $T_1>T_2$，故有 $\frac{1}{T_1}<\frac{1}{T_2}$，即括号内的数值是负值。因此，热量从冰块流入水中就会相当于熵减少，而这是与热力学第二定律有矛盾的。但是，如果热量是从热入流入冰块，上面的符号都要反过来，熵的改变就成为正的了，这个过程就符合热力学第二定律。这个论证当然只适用于“孤立”体系，即只适用于外界不提供能量的系统。对于厨房冰箱或窗户上装的空气调节器说来，热是从冰箱或屋内流到外界热空气中去的，但这时熵的减少是靠驱动马达所作的功来补偿的。

熵增加原理使我们有可能用一个比较简单的方法导出第98页上提到的热机效率的公式。令发热器和冷却器的温度是 T_1 和 T_2，并假定从发热器中取出了一定量的热量 Q_1，冷却器得到的热量 Q_2 要少一些，差值 Q_1-Q_2 将转化为机械能。于是发热器的熵减少 $\frac{Q_1}{T_1}$，而冷却器的熵将增加 $\frac{Q_2}{T_2}$。因为冷却器中熵的增加一定大于或至少等于发热器中熵的减少，故可以写出：

$$\frac{Q_1}{T_1}\leqslant\frac{Q_2}{T_2}$$

由此得到

$$\frac{Q_1}{Q_2}\leqslant\frac{T_1}{T_2} \quad \text{或} \quad \frac{Q_2}{Q_1}\geqslant\frac{T_2}{T_1}$$

用简单的代数可将上式写成：

$$\frac{Q_1-Q_2}{Q_1}\leqslant\frac{T_1-T_2}{T_1}$$

这就是我们前面提到的公式。

喝 水 鸟 儿

日本的喝水鸟是根据热机原理设计的一种精巧的玩具（图IV-7）。它是一只抽空的玻璃容器，由两个玻璃球中间一根长管子相联而成。容器中放有一定量的乙醚，乙醚在室温下可以很快地蒸发。原来充满在体部玻璃球中的乙醚蒸汽，要上升到头部玻璃球中，而头部比较冷，因为包在它上面的一层水使它不断保持湿润状态。当乙醚在头的下部凝结起来时，是不能流下去的，因为管子一直伸到了玻璃球的中心。如果聚集的乙醚足够多，头就变得比身体重了，鸟儿就绕着支轴摆到几乎水平的位置，使乙醚可以流回身体的玻璃球中，这一来鸟又能重新站直了。鸟儿每次弯下来时，它的嘴就泡在水里，使头部继续是冷的。

如果玻璃杯中装的不是水，而是伏特加酒，或是装纯酒精，头部的冷却会更厉害，鸟的动作也就会加快。相反，如果我们用一个玻璃罩把鸟儿罩起来，罩内空气很快就会充满水蒸汽达到饱和，鸟儿就不动了。当空气湿度较高时，鸟儿的动作也是不太灵的。事实上，作者在华盛顿典型的夏季气候里重复这一实验时，就根本无法让鸟儿动作起来。

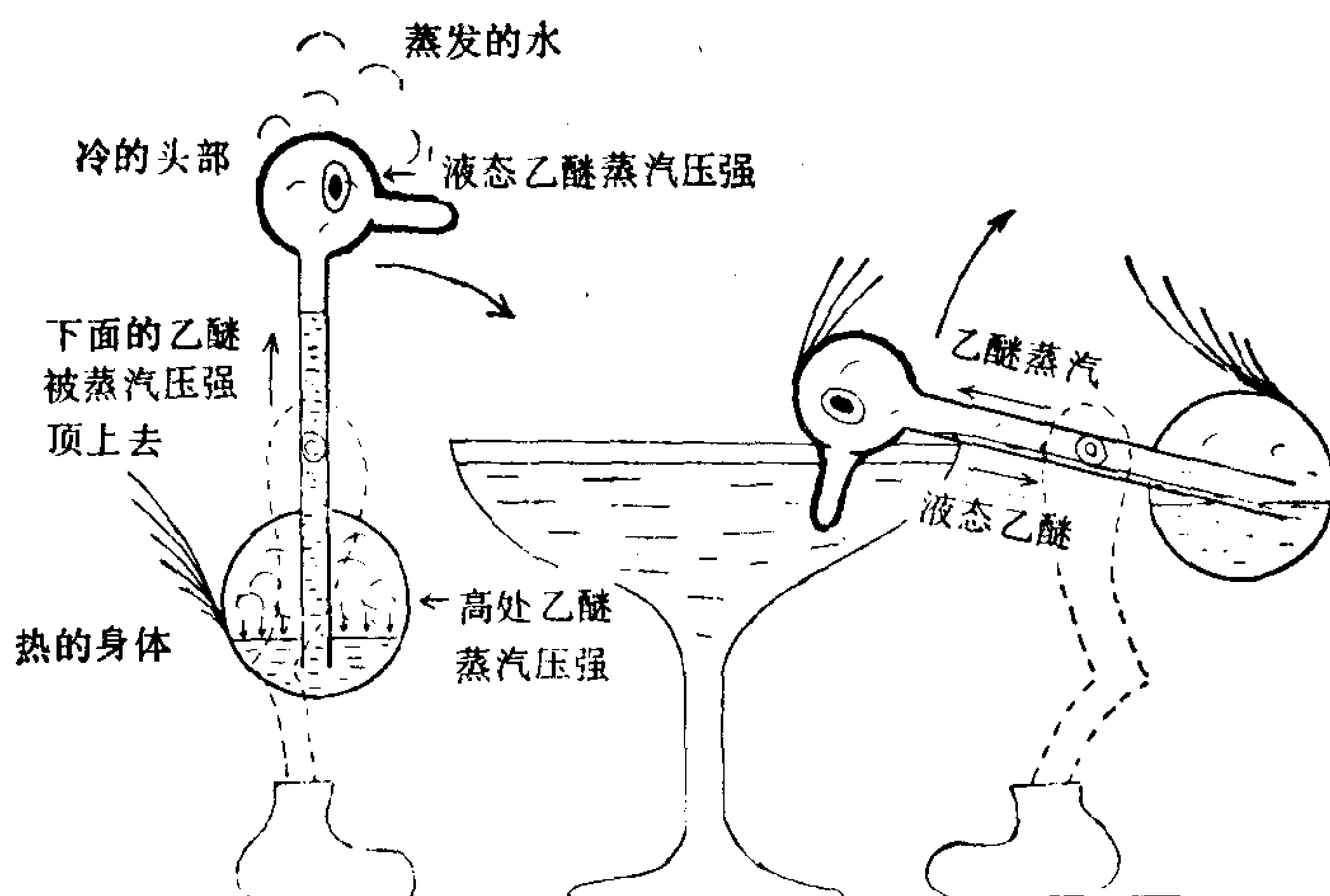


图 IV-7　日本的喝水鸟儿

这个小玩艺是根据水的蒸发原理工作的，我们可以提出一个与此有关的有趣的物理问题。假如我们在鸟儿的摆动轴上附装一种齿轮机械，我们就能得到一定量的机械能来带动水泵，把水从下面的海中汲到玻璃杯里来。鸟儿能放在海拔多高的地方还会继续工作呢？我们可以把它看成一个热机，热从鸟儿较热的身体流向较冷的头部，其中有一部分转变为机械能。水的汽化潜热（从冷的鸟头放出的）是每克 539 卡，相当于 2.26×10^{10} 尔格的机械能。这

个数字一定就是一克的水从鸟头汽化时，由热空气流入鸟儿身体内的热量(因为在鸟儿身体中没有热的聚集或损失)。热机把热转变为机械能的效率是$\frac{T_1-T_2}{T_1}$。在我们这种情况下，T_1 和 T_2 差不多都是 300K（室温），差值 T_1-T_2 只有几度。比如，若取此差值为 3℃，则效率约为 1%，所以一克的水从鸟头汽化时将大约可以产生 2×10^8 尔格的能量。要把一克水升高一厘米所要做的功数值上等于重力加速度值，此值约为 1000(981 厘米/秒^2)，所以一克水从鸟头蒸发时所能做的机械功，能把另一克水从海平面往上提到 2×10^5 厘米或 2 公里的高度。当然，以上的计算是很粗略的，各种能量损失会使这个数字大大减小，但事实是，当我们把喝水鸟放在相当高的高处时，它还能喝到海水。

第一类永动机与第二类永动机

过去，人们一直梦想着有一种机器，能不停地工作而不用燃料或由外界补充任何其它能量。我们在第二章中讨论的斯特文斯循环链，当时就常常被用来作为这种机器的一个可能的设计方案，后来才由斯特文斯本人证明了，如果正确地应用斜面上的力学平衡定律，它是不会动起来的。

虽则第一类永动机与热力学第一定律即能量守恒定律有矛盾，但人们还可能设想与热力学第二定律有矛盾的第二类永动机。的确，如果我们能把热量百分之百地转化为机械能，机械工程就会胜过所有那些大吹大擂的原子能设计了。那时我们会造得出一种远洋航船，把海水抽上来，从其中取出热量来开动发动机，而把生成的冰块抛入海中。我们就会造出一种汽车和飞机的发动机，它能吸收空气，利用其所含的热量作为动力，而把冰冷的喷气从排气管喷出去。我们就会造出……

但是，所有这些妙不可言的可能性都由于热力学第二定律即熵增加定律而落空了！

热力学的论证

只要我们承认热力学定律，我们就可以利用这些定律来讨论各种物理现象，并证明有关这些现象的许多重要结论。例如，让我们考虑一只盛水的盘子，其中插入一根毛细管垂直于水面（图IV-8）。为了使这个系统与外界隔绝，我们给它罩上一个玻璃罩，并抽去里面的空气。我们知道，水在毛细管中要上升并形成月牙形凹面。现在让我们来问一问，这时会发生什么情况。首先，盘中有一部分水会转变为水蒸汽，充满玻璃罩的内部。由于重力，底部蒸汽的密度和压强要高些，而顶部的则低些，就象地球外面大气的情况那样。而我们知道，在任一给定温度下，蒸汽与液体达到“平衡”状态时的压强是一定的。如果蒸汽的压强太高，它就会有一部分凝聚成液体；如果太低，有一部分液体就会蒸发，产生更多的蒸汽。现在我们要通过热力学的论证来证明，毛细管中凹形液面上的蒸汽压强比平面上的压强小。实际上，假定上述说法不对，蒸汽压强与液体表面的曲率无关，这时会怎样呢？由于重力，毛细管中凹面上的蒸汽压强要比盘中水面上的压强低，所以毛细管内的

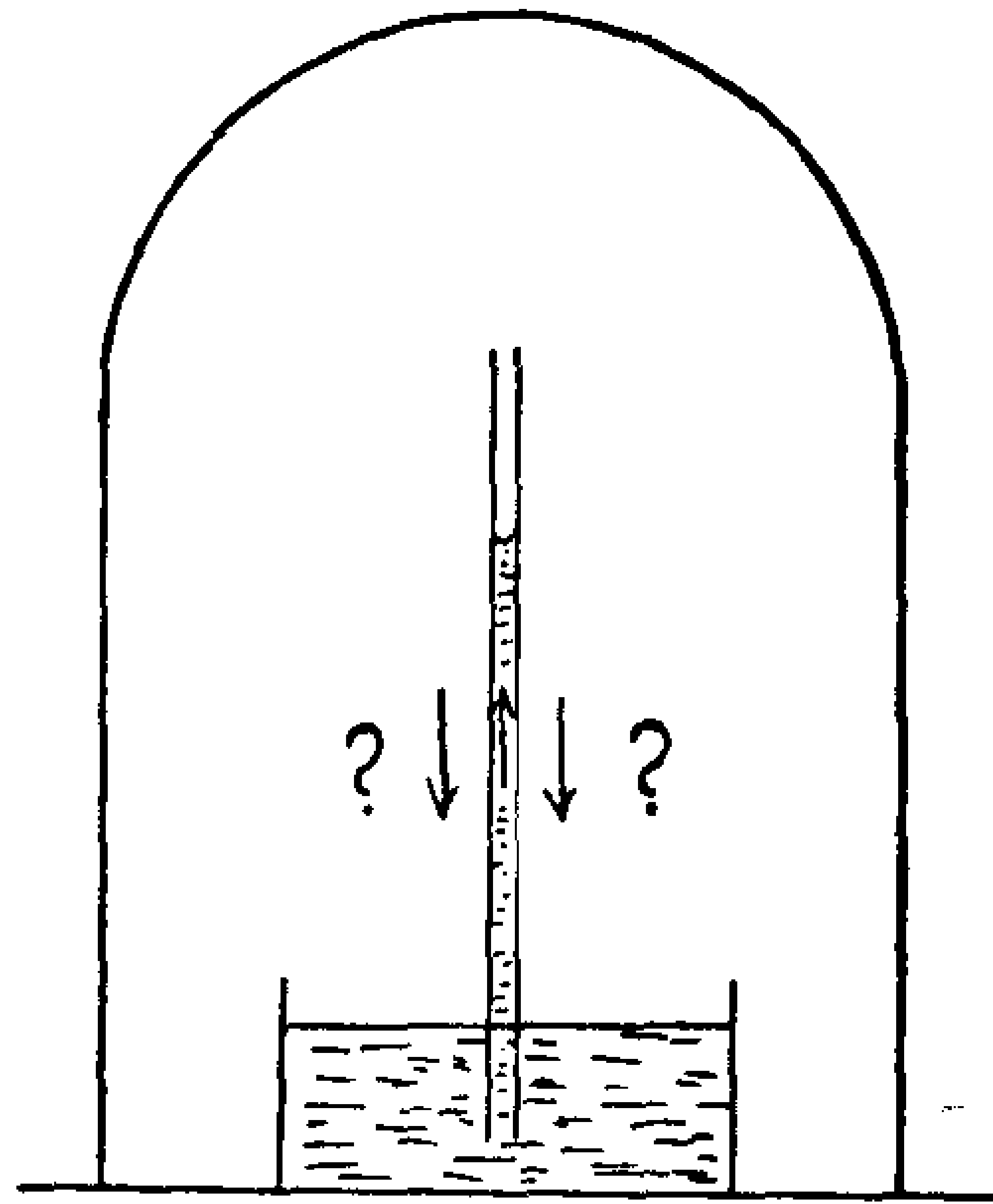


图 IV-8 热力学论证的例子。如果毛细管中凹形月面上的压强与盘中水平面上的压强相同，水就会沿着图中箭头所示方向处于永恒运动的状态。

水就会蒸发并在盘中凝结。这就会在毛细管中引起一股向上的水流，这个运动会不断地运动下去。于是我们就可以在毛细管中装上某种小水轮,可以无止境地开动机械,而这是与热力学第二定律有矛盾的。因为这个定律不应被违反,所以我们得出结论:凹形液面上的蒸汽压强要比平面上的压强低。同理(用一只蜡制的毛细管，这时月牙形液面低于盘中水面，并且是凸起的)，可以得出结论:凸形液面上的压强要比平面上的高。毛细管越窄，高度相差就越大,结果蒸汽压强的变化也越大。应用表面张力常数(它确定着毛细管中水柱的高度)和水蒸汽密度(它确定着盘中水面和毛细管中水面的压强差)的数值,我们就可以得到一个公式，表示蒸汽压强随液面曲率的变化关系。如果这个公式不正确，水就会不断地流过毛细管,我们也就会有第二类永动机了。

上面得到的结论对于理解下雨现象有着重要意义。高空的浮云是由无数细小的水滴(雾)组成的,这些水滴又小又轻,以致实际上它们不会掉下来。其中有些水滴较大，有些较小。水滴大小的这种差别有什么结果呢？正如我们刚才所看到的，凸面上的蒸汽压强比平面上的高,压强差随着曲率半径的减小而增大。这样,较小水滴表面上的压强就高些，较大水滴表面上的压强就低些。由于这一压强差,水蒸汽就会从小水滴向大水滴流动,并凝结在它们的表面上,使它们变得更大。相反,小水滴要逐渐蒸发,最后消失了。越来越大的水滴很快会变得很大而无法飘浮在空中，于是成为雨落到我们的头上和雨伞上。

热的分子运动论

热的理论以及热力学基本定律与热是一种微粒运动的能量这个观念之间关系的进一步发展，主要是由德国的玻尔兹曼、英国

的麦克斯韦和美国的吉布斯(图 IV-4 和图 V-16)在上个世纪最后二十五年完成的，这种微粒就是组成一切物体的分子。在考虑组成物体的无数微小分子的运动时，我们当然不可能逐点跟踪每个个别粒子的运动轨道。我们所要知道的，是分子在不同物理条件下的平均行为，这就要用统计学的定律。统计方法在涉及到大量的人的人类事物中是常用的。人寿保险公司、处理农民的粮食产品的政府机关等等，都是靠统计数据来确定其政策的，它们并不关心某位先生的死亡细节或某人经营的农场的详细情况。如果考虑到美国人口大约有 170,000,000，而 1cc 空气中的分子数是 20,000,000,000,000,000,000，我们就明白统计规律在分子场合一定比人的场合更为适用得多了。

在气体情况下应用统计考虑是最容易的，因为气体与液体和固体不同，其分子可以在空间中自由地飞来飞去，互相之间或与容器壁发生碰撞。装着气体的容器壁不断地受到分子的轰击，并将分子弹回去，平均起来容器壁受一固定的力，这就是气体的压力。假定同量的气体被装在一只体积只有原来一半的容器中。因为这时单位体积中的分子数目增大了一倍，所以每秒钟将有多一倍的分子从给定面积的容器壁反弹回来，因此气体的压强也增大一倍。这就解释了玻意耳所发现的气体压强与其体积成反比的定律。

现在我们来考虑分子运动速度加快时会发生什么情况。这有两个结果：1)在器壁的任一给定面积上，每秒钟内会有更多的分子到达；2) 由分子的机械动量(用牛顿的话来说就是“运动的量”)所决定的每次碰撞的强度将要增大。因为这两个效应都与分子的速度成正比，所以压强是随着速度的平方而增大，亦即随分子的动能而增大。我们知道，根据查理-盖吕萨克定律，一定体积的气体的压强与其绝对温度成正比，由此可见，绝对温度不过就是分子热

运动能量的量度。它和我们所讨论的是何种分子无关，因为统计力学的基本定律之一“能量均分定律”说，当两种以上不同质量的大量粒子混合起来时，每个粒子的平均动能都是相同的。例如在氢分子和氧分子的混合物中，氧分子比氢分子重 16 倍，其速度比氢分子小 4 倍，所以它们的质量与其速度平方的乘积是一样的。在室温下，即在 300K 左右时，热运动的能量约为 0.000,000,000,000,000,2 尔格，对空气分子来讲，相应的速度是 50000 厘米/秒(约为每小时 1000 英里)。

热运动的能量由绝对温度决定，这当然只是大量粒子的平均结果，同时，作为统计现象常有的情况，个别粒子的能量也许会与平均值表现有很大的偏离。由于它们相互之间碰撞的无规则性，有些分子在短时间内可能获得很大的速度，而另一些也许可能暂时慢下来。应用统计力学的定律，我们可以算出气体中不同程度地偏离平均速度的分子数的百分比。这个速度分布曲线首先是由麦克斯韦算出的，所以就用他的名字来命名，该曲线如图 IV-9 所示。

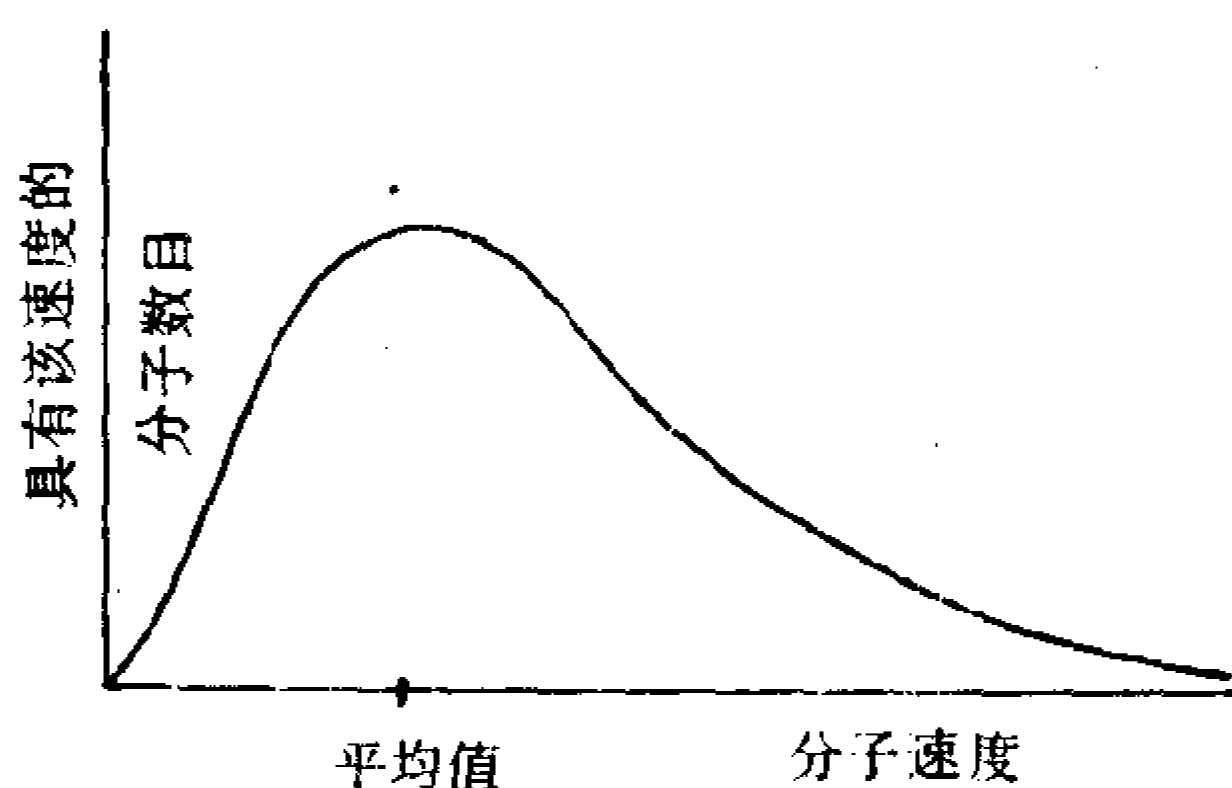


图 IV-9 麦克斯韦速度分布曲线。

气体统计理论中的另一个重要概念是“平均自由程”，即两次碰撞之间分子所走的平均距离。在大气中，分子的平均自由程是很短的，大约只有 0.00001 厘米，但在遍布于星际空间的很稀薄的气体情况下，也许要走许多英里才能碰上另一个分子。自由程短说明这样一点：尽快运动的分子从房间的这一头跑到另一头也要花很长的时间；事实上，它们就象是足球运动员盘着球冲向门线时，

几乎每走一步都要受到对方的阻拦。当然，足球队员是以门线为目标努力向它跑去，而分子则是盲目地运动，每一次新的碰撞之后是向随便一个偶然的方向跳开去。这种运动称为“无规行走”，数学上可以证明，在无规行走运动的情况下，行走多步后所经过的平均距离等于每一步的长度乘以总步数的平方根，而不是象在一个固定方向上走路那样等于每一步的长度乘以总步数。因此我们有如下的公式：

$$\text{走过的距离}=\text{步长}\times\sqrt{\text{步数}}$$

在空气分子的情况下，每一步的长度是 0.00001 厘米，如果它们要走比如 10 米的距离（1000 厘米），则上一公式表明总的（无规）行走步数必须等于

$$\left(\frac{1000}{0.00001}\right)^2=10,000,000,000,000,000$$

当速度是 50000 厘米/秒时，每一步需要 $\frac{0.00001}{50000}=0.0000000002$ 秒的时间，所以总的行走时间是 $10,000,000,000,000,000\times 0.0000000002=2000000$ 秒，或是 20 天！

热力学的基本定律说，在所有关于热的过程中熵总是要增加的，热的分子运动能怎样解释这个定律呢？从分子运动的统计理论的观点看来，熵的意义究竟是什么呢？为什么热总是从热的物体流向冷的物体，为什么一定量的热不能完全转变为机械能，而机械能完全转变为热就毫无问题呢？只要我们具体设想一下分子在这些情况下的行为，所有这些问题就都可以很自然地得到回答了。试考虑一只容器被一块隔热板分为两半：一半充以热的气体，另一半充以冷的气体，然后把隔板抽去。这会发生什么情况呢？显然，热气体的分子运动得快，它们在与冷气体的较慢的分子碰撞中将失去其能量，这个过程将一直继续进行到能量在所有分子之间均

分为止，即容器两半边的温度达到相等为止。这种情况就象是有一只桶，桶的下半部装满小黑珠，上半部装白珠。如果我们摆动这只桶，珠子就会混合起来，乃至最后白珠和黑珠会均匀分布在桶底和桶顶之间。能否再继续摇下去使它们重新分开呢？理论上讲是可以的。事实上我们没有理由说这种重新分开的情况不会发生；但发生这种情况的可能性非常非常小；我们也许要摇上几个世纪，或许几百万年，才能使全部的黑珠重新集中到桶的下边，全部白珠重新集中到上边，这全得靠偶然性。气体分子的情况也是如此。在原则上说，分子中的半数有可能由于无规则碰撞而会慢下来，正好都在平均速度之下，而一半会快起来，正好都在平均速度之上。但这种可能性是非常小的；

机械能与热之间的相互转变也存在着与此类似的情况。试想象有一粒子弹打在铁墙上。当子弹飞向靶子时，它所有的分子是沿同一方向并以同一速率在运动（分子的这一共同运动当然要叠加在由于子弹具有初始温度而引起的不规则运动之上）。当子弹为墙壁所止时，这个有序的运动就转化为个别粒子不规则的运动，增强了子弹和墙这个系统中分子的原来的热骚动。现在我们再来想象逆过程：一根金属棒一头中的分子在火焰上加热，全凭偶然的机会，它们的热运动速度会全指向同一个方向，以致这条金属棒就象从枪里射出来的那样飞去。但是，这同样是一件极不能的事情。由此可见，熵增加原理不过是说，在一切自然过程中，分子的有序运动都有变为无序运动或无规运动的趋势。所有过程进行的方向都是从不太可能的分子运动模式转向可能性更大的运动模式，熵增加就相当于分子运动模式可能性的增加。

大家可以用下面简单的方法，导出给定一种分子运动模式的几率与熵之间的关系，这方法首先是由玻尔兹曼提出来的。试考

虑两个热力学系统 A 和 B，它们可以是两个容器，装着两种处于不同压力下的不同气体，也可以是别的什么复杂的系统，其中装有液体、它们的蒸汽、固态晶体或其溶液等等。如果这两个系统具有相同的温度 T，我们使它们彼此发生热接触，那么，在随便哪个方向都不会有热的流动，这两个系统将仍保持它们彼此隔离时那样的状态。现假定有一定的热量从外界流入这两个系统，A 系统获得热量 Q_A 卡，B 系统获得 Q_B 卡。如果分别考虑两个系统，它们熵的增加便是 $\frac{Q_A}{T}$ 和 $\frac{Q_B}{T}$。若是把它们看作一个复合系统，则总的熵增加将是 $\frac{Q_A+Q_B}{T}$。因为 $\frac{Q_A}{T}+\frac{Q_B}{T}=\frac{Q_A+Q_B}{T}$，故可得到结论：复合系统的熵等于其各部分熵的和。

从分子运动的各种模式的几率这个观点来看，如何解释这种情况呢？怎样用 A 和 B 各自的几率来表示 A 和 B 这个复合系统的几率呢？根据几率的数学理论，一个复合事件（就是要满足几个独立条件的事件）的几率等于组成这事件的各单个事件的几率之乘积。例如，如果一个女学生盲目去赴一个约会，希望对象是一个"高大、黑皮肤而又漂亮"的人，她的希望能得到满足的几率乃是对方高大的几率、黑皮肤的几率与漂亮的几率三者之乘积。如果男人中高大的几率是1/4，黑皮肤的几率是1/3，漂亮的几率是 1/50，则此三个条件全都满足的几率是

$$1/4\times1/3\times1/50=1/600$$

即只有六百分之一的机会。

由此可见，虽然在一个复合的热力学系统中熵必须相加，但几率必须相乘。两个量之间的哪一种数学关系能满足这个条件呢？当然是对数关系了，因为两数相乘时其对数必须相加。因此，熵一定是按照几率的对数形式而变化的，故要写成：

$$S=k\cdot\log P$$

式中 k 是数字系数，后来叫作玻尔兹曼常数。

上述公式在经典热力学和热的分子运动论之间构成了一座桥梁，使我们可以根据统计考虑算出所有的热力学量。

麦克斯韦妖

麦克斯韦“妖”是统计物理中一个很重要的角色，它是对这门科学有过很大贡献的麦克斯韦（图 V-16）想象中的产物。想象有一个很小而又十分灵活的妖精（图 IV-10），它能看到个别分子，并

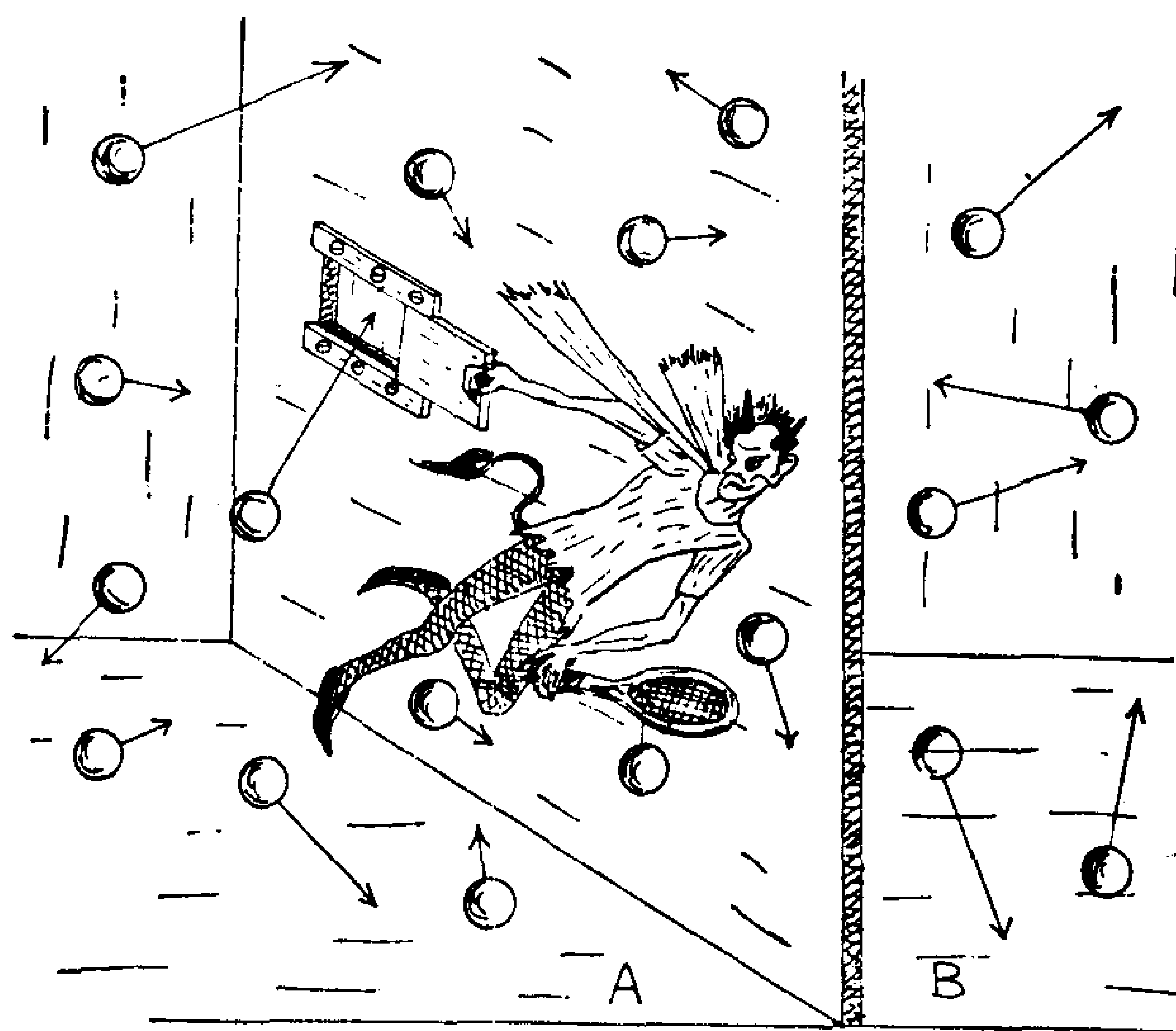


图 IV-10 麦克斯韦妖，据称它能把快分子和慢分子分开。

且动作很快，可以象一位网球冠军对付网球那样去对付分子。这个妖精操纵着隔开 A 和 B 两个充气小室的一面墙上的小窗，就能帮助我们去粉碎熵增加原理。假定小窗的窗盖可以毫无摩擦地滑

动，每当妖精看到一个很快的分子迎窗而来时，他就打开窗盖，而当前来的分子是慢分子时，就把它关上。这样，麦克斯韦分布中所有的快分子就都进到B室，而只有慢分子仍留在A室。B就会逐渐变热而A逐渐变冷，因此热是沿着错误的方向流动，违反了热力学第二定律。

若是不靠一个真正妖精的帮助，我们当然不能做到这一点，但是为什么我们也不能利用一种结构灵巧的、能以同样方式动作的很小的物理装置来做到这一点呢？为了理解这种情况，让我们回忆一下著名的奥地利物理学家薛定锷（图 VII-19）在他所写的一本很有趣的小册子"什么是生命"* 中提出的一个难解的问题："原子为什么这样小？"乍一看这个问题显得毫无意义，但是假如我们反问："我们为什么这样大（与原子比较）？"这个问题就有了意义并且是可以回答的了。答案很简单，就是：象人这种具有大脑、肌肉等等的复杂机体，是不可能只由少数几打原子构成的，正如我们不能只用几块石头就把哥特式的大教堂建造起来一样。

麦克斯韦妖以及任何要用来代替它的力学装置，都得由少数原子制成，因此是不可能完成赋予它们的复杂任务的。粒子数越少，其行为的统计起伏就越大，一辆汽车的四只轮子中若有一只可以跳上来变为方向盘，而水箱和油箱又可以互换位置的话，这辆车子驾驶起来是靠不住的！同样，一个麦克斯韦妖，不论它是真的还是机械的，在对待分子时都会造成许多统计差错，以致整个计划将要遭到完全失败。

微观的热运动

上面引用的分子世界中的很大数字和很小数字都是计算的结

* Cambridge University Press 1944.

果，因为分子及其运动即使利用最好的显微镜也小得看不到。然而碰巧的是，通过观察直径约为一微米左右的微粒的运动，我们还是可以把看不见的分子和我们日常经验中所遇到大物体联系起来的，这些微粒一方面要足够小，以显示可以看得出的热运动，另一方面又要足够大，能用良好的显微镜来观察。英国植物学家布朗第一个注意到，飘浮在水中的植物花粉从不静止，而是象跳一种“塔兰台拉”* 舞那样无规则地跳来跳去，仿佛不断地被某种看不见的力量踢来踢去似的(图IV-11)。布朗本人和当时的科学家都不能解释微粒的这种极度紧张的行为。几乎一个世纪之后，法国的物理学家皮兰才解释了它，认为那是因它受到处于热运动中的水分子无数次碰撞的结果。皮兰对布朗运动的研究无可争辩地证明了热的分子运动论的正确性，使物理学家直接观察到了分子运动的统计规律，而在此之前，它不过是理论上的一种推测而已。布朗运动的精确数学理论是由年轻的爱因斯坦在他发表于 1905 年的三篇论文

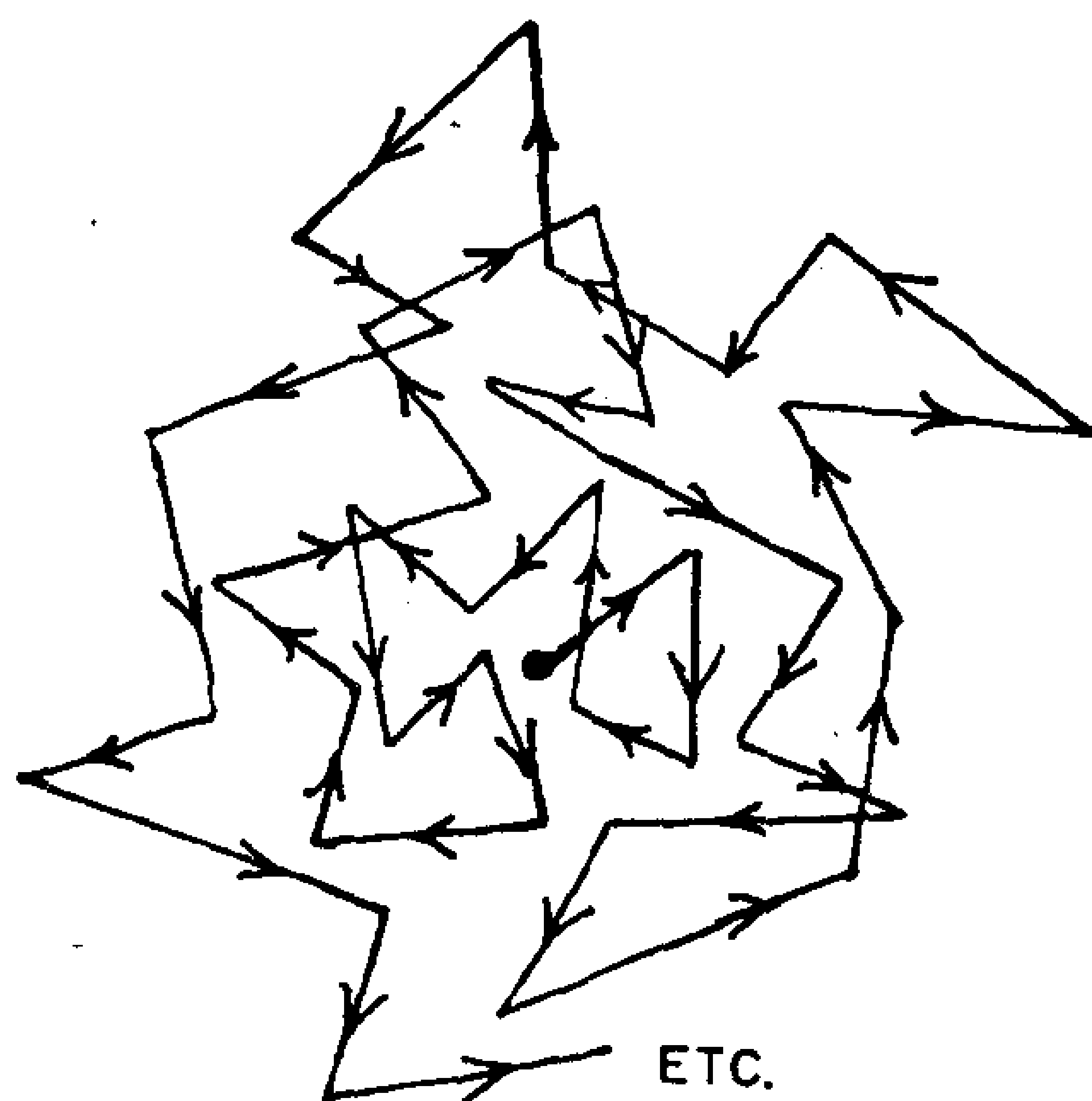


图 IV-11 “无规行走”是物体的一种经常不断地、无规则地改变方向的运动，这是物体与其它物体相碰撞的结果，它可以是一个分子与其它分子的碰撞，或者是一个醉汉和路灯杆子相碰撞。显然，物体作无规行走时，它前进的路程比沿直线走时小些。可以证明，物体这时离出发点的平均距离等于每步的直线长度乘以步数的平方根。

* 译注：塔兰台拉舞是流行于意大利南部的土风舞。

中的一篇里建立起来的。其余两篇是关于光量子的理论和相对论的。今天，热的统计理论(通常大都称为"统计物理")在其完整性和透澈性方面只有牛顿力学能够与之相比。

热运动与声音的传播

大家都知道声音无非是在空气中和其它物质中传播的压缩波。实验研究揭示了一个有趣的事实：声音的速度与空气的密度无关，在海平面上和高空稀薄的大气中是一样的。但是，声音速度与空气的温度有关，与绝对温度的平方根成正比。我们怎样从分子结构和热运动的观点来解释这些事实呢？

为此我们要记住，空气是由大量在空间中作剧烈运动的分子所组成的，它们的速度随温度的升高而增大。当一压缩声波发出时，比方说是由一振动音叉发出的，则音叉附近的空气分子便在音叉振动的方向被推动，而与别的离得更远的(下一空气薄层中的)分子发生碰撞，把这一推动力传下去。这样一层一层地顺序推动分子，使压缩在空气中传播，就形成声波。因为空气分子在与下一层的分子相碰之前必须飞行一段较长的距离(即所谓的"自由程")，所以传播速度主要取决于分子的热运动速度。这个动力学图画就解释了上述关于声速的两个事实。实际上，分子的热运动速度在给定的温度下是不变的，与气体究竟有多少被压缩或被稀析无关。另一方面，因为分子的动能与温度成正比，故其速度是随温度的平方根而增大。所以如果对分子速度是正确的东西，对声速也一定是成立的。

如果使气体产生压缩的物体速度超过给定条件下的分子热运动速度，情况就完全不同了。例如爆炸中产生的热气推动周围的空气，或者空气被超音速或导弹的机翼和机体所推开时，就是这种

情形。在这种情况下，分子的热运动速度不够快，无法避开前进着的“推动体”，因而一个个被堆积起来，结果使密度增大。这与上面讨论过的情况之间的差别可用图 IV-12 来说明。被高度压缩的气体的前沿，形成所谓冲击波。由于密度增加很大，冲击波便相应具有大的过压，所以它们具有破坏性的后果。在爆炸的情况下，热气的膨胀变慢，空气的压缩与“推动器”分开，并继续以冲击波的形式前进。在超音速飞机和导弹的情况下，它们靠发动机推动以不变的速度向前飞行，冲击波相对于运动物体保持不动，因此称为“驻立冲击波”。

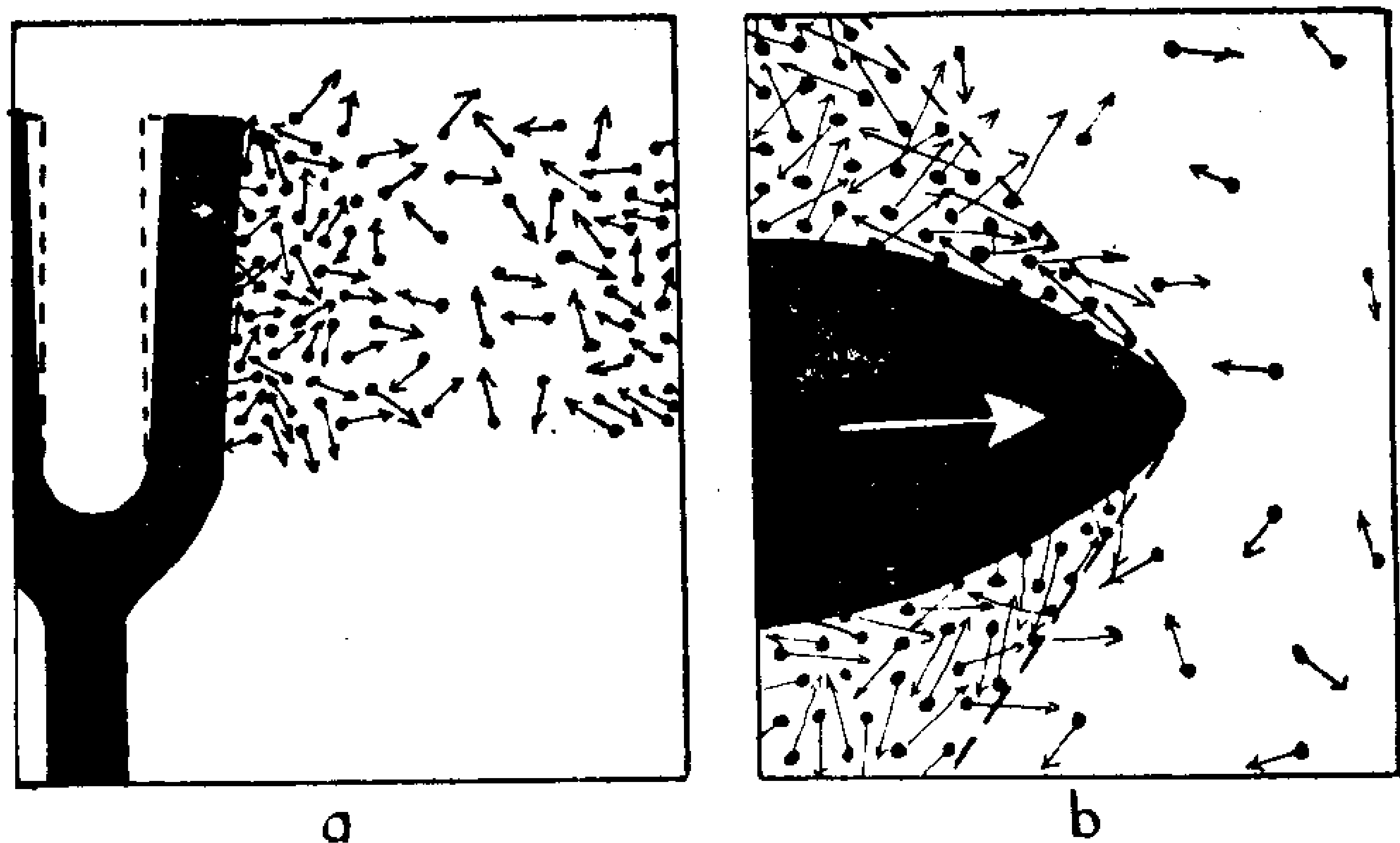


图 IV-12　a）当“推动器”运动得比分子慢得多时形成声波；b）当“推动器”运动得比分子快时形成冲击波（驻立冲击波）。

炽热物体的光辐射

大家都知道，所有的物体在加热到足够高的温度时都变为发光体。旧式气灯的火焰就是这样发光的；现代电灯泡的灼热灯丝也是这样发光的。在宇宙的尺度上说，太阳和恒星发光是因为它们的表面非常热。一般的经验是，在较低温度下，例如从房间里

的暖气，我们得到的是辐射热而不是可见光。厨房里的炉火达到600℃～700℃的温度是"红的热"，发出微弱的红光。灯泡的灯丝被加热到2000℃以上温度时，将发出明亮的光，但与耀眼的电弧光相比略显黄色，电弧光的产生温度是在3000℃～4000℃之间。太阳表面的温度是6000℃，它发的光中蓝光的成份比上述所有光源发出的光都更丰富些。因此，随着温度升高，发出的辐射强度很快增加，而且波长短的成份越来越丰富。图IV-13表示观察到的物体在不同温度下发出的辐射中各种波长的强度分布。在2000°K时，所有的能量都集中在长波热辐射区，用阴影表示的可见光区中的强度等于零。4000°K时发射一些可见光，但红光的强度大大超过黄、绿和蓝光。6000°K时(太阳表面的温度)强度的极大值落在黄光区，发射出我们收到的各种颜色混合成的"白光"。温度更高时，强度的极大值移向不可见的紫外区；有些恒星是如此之热(几十万度)，以致它们所发射的光大部分都落到这个不可见的紫外区了。

炽热物体的光发射服从两个重要的定律，它们是上个世纪后半期发现的：

维恩定律，它是由德国物理学家维恩(1864—1928)确立的。这个定律说，辐射光谱中最大强度所对应的波长与灼热发射体的(绝对)温度成反比。我们从图IV-13中看到，6000°K时强度的最大值是在5000Å处，而在2000°K时它移到了15000Å的位置。

斯忒藩-玻尔兹曼定律，它是由德国物理学家斯忒藩(1835—1893)发现的，后来又由上文提到过的玻尔兹曼利用热力学的论据从理论上导出了它。这个定律说，一个炽热物体所发射的总能量，与其(绝对)温度的四次方成正比。确实，在图IV-13中，标有6000°K的那条曲线下的面积，要比标有2000°K那条曲线下的面

积大 $3^4 = 81$ 倍。

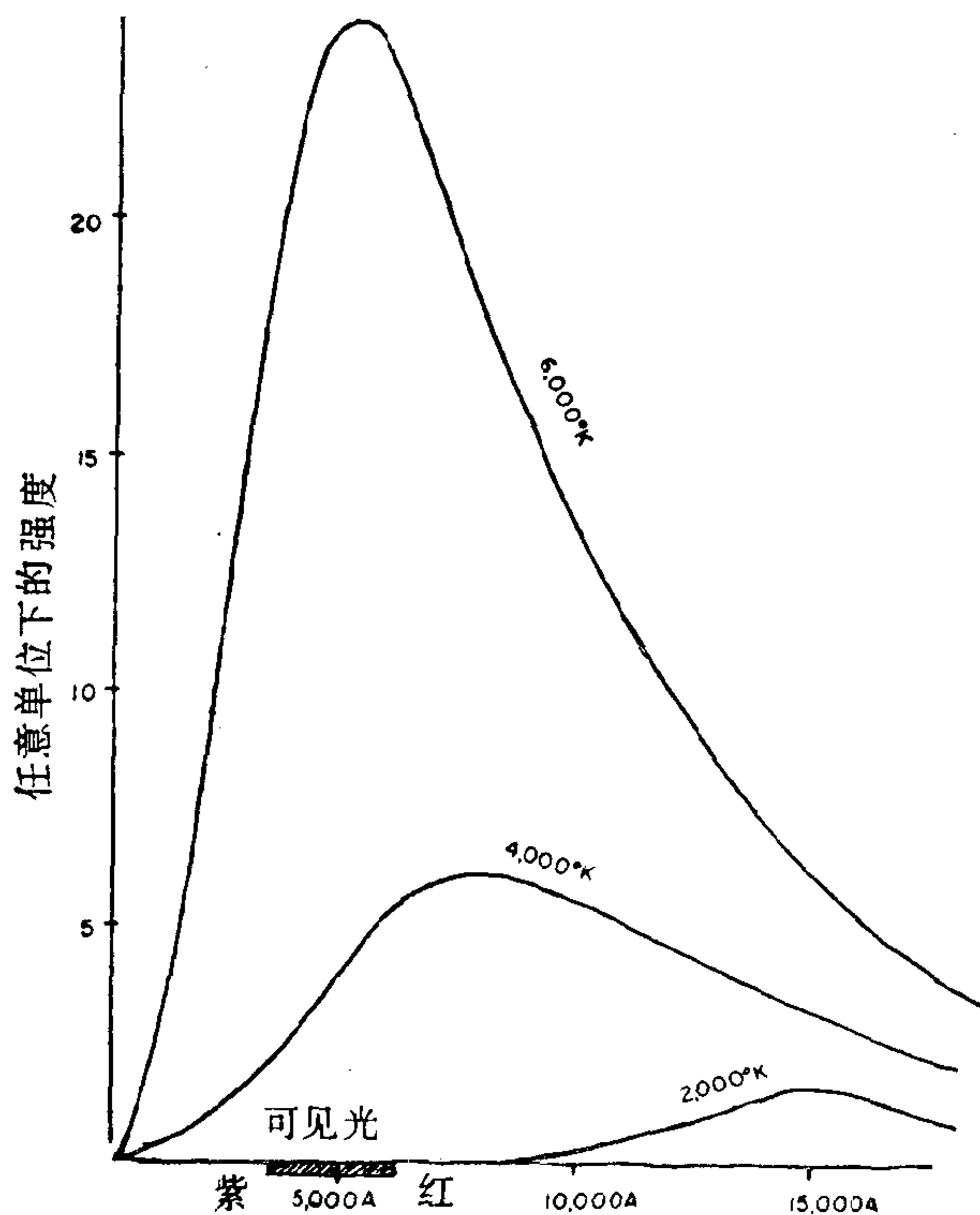


图 IV-13 物体在三种不同温度时发射的连续谱的能量分布。

炽热气体的光发射

上一节中关于炽热物体光发射的讨论，适用于固体或液体物质的情况，如电灯泡里的钨丝或铸造车间里的铁水等*。在炽热气

* 太阳物质是处在气态，因为它的温度极高，从表面上的 6000°K 一直增加到中心处的 20,000,000°K。然而，除了外部一个称为色球层的薄层以外，构成太阳体的气体都被压缩了，其密度可与普通固体和液体物质的密度相比，所以太阳是发射连续光谱。

体发光的场合，我们遇到的是完全不同的情况。如果我们通过棱镜去观察气灯(或煤油灯)发光，我们看到的将是从红一直到紫的连续谱。但是可以证明，这个连续谱实际上并不是火焰中灼热气体产生的，而是其中的固态煤烟微粒产生的。如果气体能够完全燃烧，象德国物理学家本生(1811—1899)所发明的本生灯的情形那样，我们就可得到很热而发光很弱的火焰。本生利用他的灯研究了各种物质在气态下的发光情况。假如在本生灯的火焰里加进少量固体（例如加进氯化钠，即普通的食盐)，火焰就变黄而且很明亮。若用老式的牛顿棱镜来分析这种光，就会发现其光谱只有单独一条黄线,其它所有的波长完全没有(图 IV-14 a)。用钾来做类似的实验时,火焰是呈明亮的红色,在光谱的最右边显示一条红线。其它物质在本生灯的热焰中变为蒸汽时会产生其它的谱线，有时是单独一条,有时是多条。

为什么炽热气体发射的光的波长(或者也可以说是频率)有严格的选择性,而炽热固态和液态物质却是发射整个区域的波长,构成一连续谱呢？我们以后将在本书看到，一个原子或分子可以比作一个乐器，唯一的区别在于它们所发射的是光波而不是声波。一个乐器,一支普通的音叉也好，一架大钢琴也好，制造时都是让它们只能发出各种经过选择的音频(音叉是一种音频,钢琴是多种音频)，这些频率顺序发出，便形成动听的音乐。原子和分子也只能发出波长有选择的光，每一种原子或分子都各有其特具的发光波长。气体的原子或分子在空间自由地飞行，彼此不时要发生碰撞。每次碰撞时，它们就被“激发”(如果温度足够高的话)并继续飞行,同时产生振动和发射它们自己特有的光波。因此,钠、铜、铁等等的蒸汽都是发射具有特征的线状光谱，通过这些谱线我们就能认出它们。但在固体中,原子紧紧地集合在一起,这种情况有点

儿象我们把一个交响乐队的所有乐器乱七八糟地全都塞进了一只大口袋。如果我们摇晃这只口袋，将会听到包含了所有音频的噪声，口袋中每种乐器的特色就无法辨认了。同样，集中在一块金属中或任何其它固体（或液体）物质中的原子，也会完全失去它们的纯音特点，烧红的铁所发的光与烧红的铜或别的什么东西所发的光就没有多大不同了。

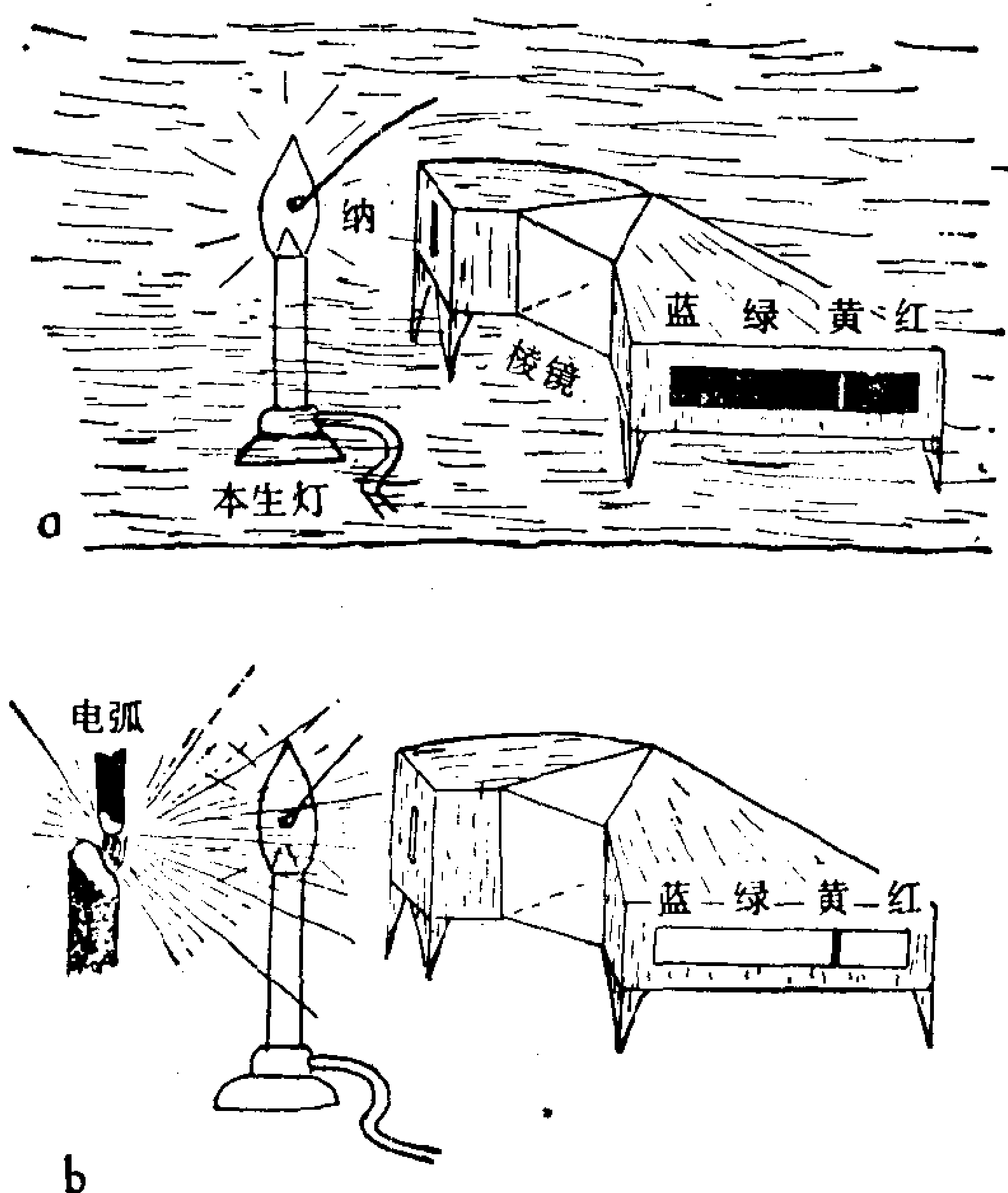


图 IV-14　a)把钠放入热焰中会发出特征黄线。b)当含有所有波长的电弧白光经过含钠的热焰时，在当初出现明显的发射亮线的地方出现了一条暗的吸收线。

不同物质的光发射各有其特征，这是光谱分析这个重要方法的基础，光谱分析法能使我们找到任何给定物质的化学组成，只要观察它的蒸汽所发的光就可以了。

光的吸收

现在让我们回到本生灯火焰中含有一些钠的实验（图 IV-14a）。假定我们在火焰的后面放一个发射连续谱的很强的光源，例如电弧(图 IV-14 b)。从电弧的白热电极发出的光，将穿过本生灯的火焰落在窄缝上，在分光镜中产生一彩色光带。但我们将发现，色彩的连续性中断了，有一条狭窄的黑线恰好取代了钠的黄线的位置。这种情况的出现是由于一种重要的物理现象，即所谓共振现象。在所有涉及到某种振荡的场合都会出现这种现象。试想象一个小孩在游戏场由他父亲推着打秋千。如果父亲有节奏地推着秋千，每次相隔的时间等于秋千自身的振荡周期，运动的幅度就会越来越大，小孩要么很高兴，要么就被吓坏了。假如做父亲的被附近一个美貌的阿姨弄得心神不定，推的时间不合适，他的努力就不会有什么好效果了。有时他在秋千离开它时推它一下，这是有帮助的；有时秋千向他摆过来时他推一下，这就帮倒忙了。要使任何振荡的振幅增大，作用力的周期应当等于振荡物体的固有周期。如果把两只完全相同的音叉放在一起，用小槌敲一下使其中一只振动起来，它所发出的声波很快就会使另一只也处于运动状态。但是，如果这两只音叉具有不同的振动周期，这种情况就不会发生。同样，在把收音机或电视机调谐到所需位置时，我们也是转动旋扭使接收机的频率等于发射台的频率。

上述用含钠火焰做的实验，也属于这个范畴。钠原子与电弧连续谱中一个特定波长发生共振，这个波长也是钠原子自己所能发射的，钠原子把这个波长的波散射到各个方向，因此这些波在原来光束中就减弱了。这时暗的吸收线当然不是完全黑的。事实上，也许比原来的发射线还要亮些，但与电弧连续谱的其它成份相

比它就显得很暗了。所有的物质都吸收自己能够发射的同样频率的光，这个定律是德国物理学家基尔霍夫(1824—1887)发现的，因此称为基尔霍夫定律。它在物理学、化学和天文学的许多方面有着很大的重要性。它最重要的应用之一，就是可以用来研究太阳和所有其它恒星的化学组成。

十九世纪初，德国物理学家夫琅和费(1787—1826)使用质量好的多的棱镜重复了牛顿关于太阳光谱的实验，他惊奇地发现，彩色带插进了大量很细的黑线。这种“夫琅和费线”的起源，可以很容易地根据以上所述的定律加以解释。我们在前面说过，虽然太阳体完全是由气态物质构成的，但它发射的是连续谱，这只是因为太阳中的原子都紧紧挤在一起，以致它们“毫无余地去拉它们的弓而不干扰邻近的选手”。但是太阳体的最外层是由很稀薄的炽热气体组成的，它称为色球层，能产生纯的光线。当光球（即太阳的致密体）发出的连续谱通过色球层时，对应于色球层中所含化学元素的波长就被吸收和散射，所以在原来无黑线的彩带中就出现了夫琅和费线。天文学中光谱分析的应用在我们关于太阳和恒星的知识方面导致了巨大的进步，在人类的眼前开辟了我们生活在其中的宇宙的无限远景。在照片II中我们复制了夫琅和费的太阳光谱，其中包括可见光部分(a)，和远紫外部分(e)，都是用现代仪器得到的。

第五章　电学时代

我们在第一章中说过，关于电和磁的现象在古希腊时代就已经知道了，或许古代其它地方也已知道。但是，最早对这些现象进行系统研究，是到文艺复兴时代的初期才开始的。伽利略的同代人，伊丽莎白一世的私人医生吉尔伯特爵士曾仔细研究了磁相互作用，并将他的研究结果发表在《论磁》一书中，书中定性地描述了磁石的所有基本性质。吉尔伯特信奉哥白尼的世界体系，他希望能把行星绕太阳作轨道运动的维持力解释成是磁吸力的结果。为了更仔细地研究这些问题，他用磁石（磁铁矿石）做了一些球，把一些小磁针放在它们周围不同的位置和距离上，来研究它们周围的场。他发现球上有一点对磁针一端的吸力达到最大值，而在相反的一点对磁针另一端的吸力达到最大值。对于球面上的各点，磁针指向一个确定的位置，它位于连接最大吸力点或磁球两极所成的大圆内。这很象罗盘针处在地球表面上各点的情况，所以吉尔伯特得出结论说，我们的地球可以看成是一块巨大的磁石，其两极位于地理上的北极和南极附近。这个概念经过了几个世纪至今仍是正确的，并被伟大的德国数学家高斯从数学上加以推广，现在成了地磁理论的标准概念。但是，吉尔伯特企图把磁力看成行星绕日运动的原因，则遭到完全的失败，经过了半个多世纪以后，牛顿才用万有引力解释了这种运动，而万有引力与磁力是毫无关系的。

当牛顿已经产生了万有引力的观念，而仍然秘而不宣的时候，以所谓马德堡半球实验（将两个金属半球放在一起并抽去其中的

空气，然后用两队马去拉也无法把它们拉开的实验)而闻名于世的德国物理学家卡瑞克，曾试图用电的相互作用来解释行星与太阳之间的吸引。虽然他也和吉尔伯特一样，在这件工作上失败了，但是他在电荷的性质方面却有了许多重要的发现。他发现经过摩擦后的琥珀虽然会吸引轻微物体，如小纸片之类，但是两个与这块琥珀接触过的轻微物体却会相互排斥。他还发现，电荷可以从一个物体传给另一个物体，它们不一定直接接触，用一根潮湿的绳子或者最好用一根金属丝把它们联起来也行。早在十八世纪，杜·费就对电的现象作了进一步的研究，发现电有两种：一种是由摩擦后的琥珀、火漆、硬橡胶和其它树脂类物质所产生的，另一种是由摩擦后的玻璃状物质如玻璃或云母等所产生的。这两种电当时被称为"树脂电"和"玻璃电"，并且确定了，同种电荷相互排斥而异种电荷相互吸引。电中性的物体被认为是物体中所包含的这两种电荷数量相等而互相抵消了，带电的物体则具有多余的"树脂电"或"玻璃电"。卡瑞克首先观察到的现象被解释成是由这两种电流体之间的相互作用所引起的。假定我们摩擦一个硬橡胶球，使它成为带"树脂电"的。如果把一个两种电抵消了的不带电的小物体放在它的附近，则其中的"树脂电"将被推到远的一端，而"玻璃电"被拉到近的一端。因为电的相互作用是随距离的增大而减小，所以作用在"玻璃电"上的吸引力将比"树脂电"上作用的排斥力大，总的结果是两物体互相吸引。如果不用硬橡胶球，而改用玻璃球，结果也是一样，不过两种电荷交换一下位置而已。因此，中性物质总要受带电体的吸引。在一个原来不带电的物体中这种电荷分开的现象，称为电"极化"或电"感应"。如果我们现在将两个小物体与一个大的带电体相接触，它们就会带同种电荷，并且在移开时将互相排斥。

在这些早期的关于电现象的研究中，发明了两种很重要的电学装置，即金箔验电器和来顿瓶。验电器(图 V-1a)是一种能显示电荷存在的仪器，最早是由赫克斯在 1705 年制成的，它是用两根麦秸并排悬挂在一根金属棒的下端。当金属棒带有树脂电或带玻璃电时，两根麦秸就会带同种的电荷，因而彼此分开。我们至今仍在使用这种装置，不过是用更轻得多的金箔来代替麦秸罢了。来顿瓶（图 V-1b）是来顿大学（荷兰）的几位科学家在 1745 年制造

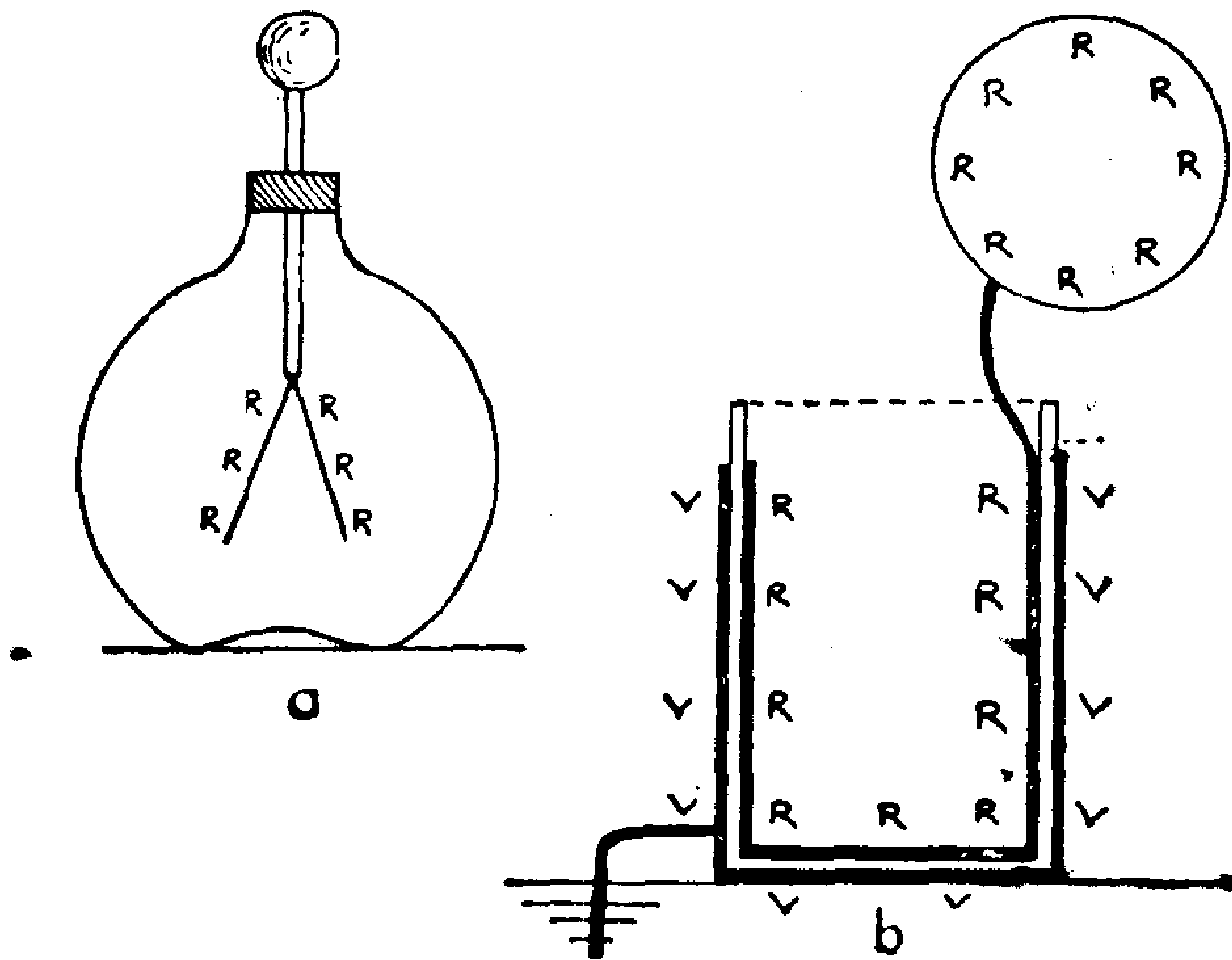


图 V-1 a)金箔验电器；b)来顿瓶

的，目的是用来聚集大量的电荷。它由一只普通的玻璃圆筒制成，内壁和外壁都贴上一层银箔。如果把外壁的银箔接地（即与大地相连)而内壁的银箔与一带电体连接，或者接法相反，电(或是“树脂电”或是“玻璃电”)就要竭力逃入地下，但被一层玻璃所阻。这样，大量电荷就在瓶中聚集起来，若用一根导线把内外两层箔片连接起来，能够引起很大的电火花。旧式的来顿瓶今天已发展成为

各种型式的电容器，它是由许多金属片中间用空气、玻璃或云母层相隔而成。这些电容器可以贮存极大量的电荷，在物理学和电子技术的各方面都有应用。例如，1930年科克罗夫特和沃尔顿在剑桥制成的第一架原子粉碎机，就是由一组这样的电容器构成的，它们可以被充电到一百万伏特。当这些电容器通过一个充以氢气的玻璃管放电时，就能产生很高能量的“原子炮弹”，去轰击放在玻璃管一端的锂原子靶，把它们破为两半。

伟大的美国政治家和作家富兰克林的工作也是在这个时期，富兰克林直到40岁壮年以后才开始对物理学感到兴趣。他不满足于用毛皮摩擦橡胶时所得到的细小火花，而想弄弄更大得多的电火花，那是宙斯* 在大雷雨时从天上扔下来的。他把一些风筝放到雷雨云中，去收集其中的电荷。牵风筝的潮湿绳子成了良好的电导体，他靠这条绳子给来顿瓶充电，然后从中取出了电火花。他的研究结果汇集在《在美国费城进行的关于电的实验和观察》一书中(1753年)，这些研究使他荣获了伦敦皇家学会会员和巴黎皇家科学院院士的称号。他用自己的实验向宙斯进行了挑战，但在电现象的理论解释方面却没有取得这样好的成绩，他引入了只存在一种电流体的假说。他认为“玻璃电”是唯一存在的一种电流体，两种不同的带电现象只是相当于这种无重量的电流体的过剩和缺少。据此，他把带有过剩“玻璃电”的物体（如摩擦后的玻璃棒）称为带正电的物体，而把缺少这种电的物体（如摩擦后的橡胶棒）称为带负电的物体。当两个物体中有一个具有过剩的电流体(玻璃电)而另一个不足时，如果它们遇到一起就一定有电流从电流体过剩的第一个物体流向不足的第二个物体。富兰克林的这些思想成了现代术语的指导思想，用现代术语来说，电流是从正电极

* 译注：宙斯 Zeus 是希腊神话中奥林匹斯山的主神。

(阳极)流向负电极(阴极)的。我们现在知道杜·费的两种电流体的观念比富兰克林的观念更为接近实际，尽管真实情况比其中任何一人所设想的都要复杂得多。现在存在着带正电和带负电的两种粒子，而对于每个通常或带正电或带负电的粒子都存在着一个相应的“反粒子”，它带有相反的电荷。富兰克林的观念在导线流有电流的情况下是比较接近真实的，这时电荷的移动完全是因为电子的运动，不过电子带的是“树脂电”而不是“玻璃电”。今天时常听到有人建议说，正负电的名称应当交换一下，以便使电流从“＋”到“－”这个约定的方向与电子运动的方向一致。但是如果这样做了，在用原子粉碎机以高能质子轰击原子靶时就会遇到麻烦；这时电流就不是从粉碎机枪口中流出，而是从靶子流进枪口了。而在沿着相反方向运动的正负离子带有同等数量电荷的液体情况下，名称上的这种改变也会是完全于事无补的。

电力与磁力的规律

在十八世纪后半期，许多国家的物理学家都在从事电力和磁力的定量研究。这方面最早的重要发现之一，是由法国人库仑完成的，他发明了一种所谓“扭秤”，来测量很弱的力。从图V-2可以看到库仑所做的这种仪器的概略。它由一根悬挂在细长线上的轻棒并在轻棒两端附着的两只平衡球所组成。当球上没有力的作用时，棒取一定的平衡位置。如果两球中有一个带电，同时把另一个带电球放在它附近，则会有电力作用在这个球上，这球可以移动，使棒绕着悬挂点转动，直到悬线的扭力与作用力达到平衡为止。因为悬线很细，很小的力作用在球上也能使棒显著偏离其原来位置，转动的角度与力成正比。库仑让这个可移动的球和固定的球带上不同量的电荷，并改变它们之间的距离，发现了一个后来

以他的名字来命名的定律，按照这个定律，电的吸力和斥力与两电荷之乘积成正比，而与它们之间距离的平方成反比（图 V-3）。利

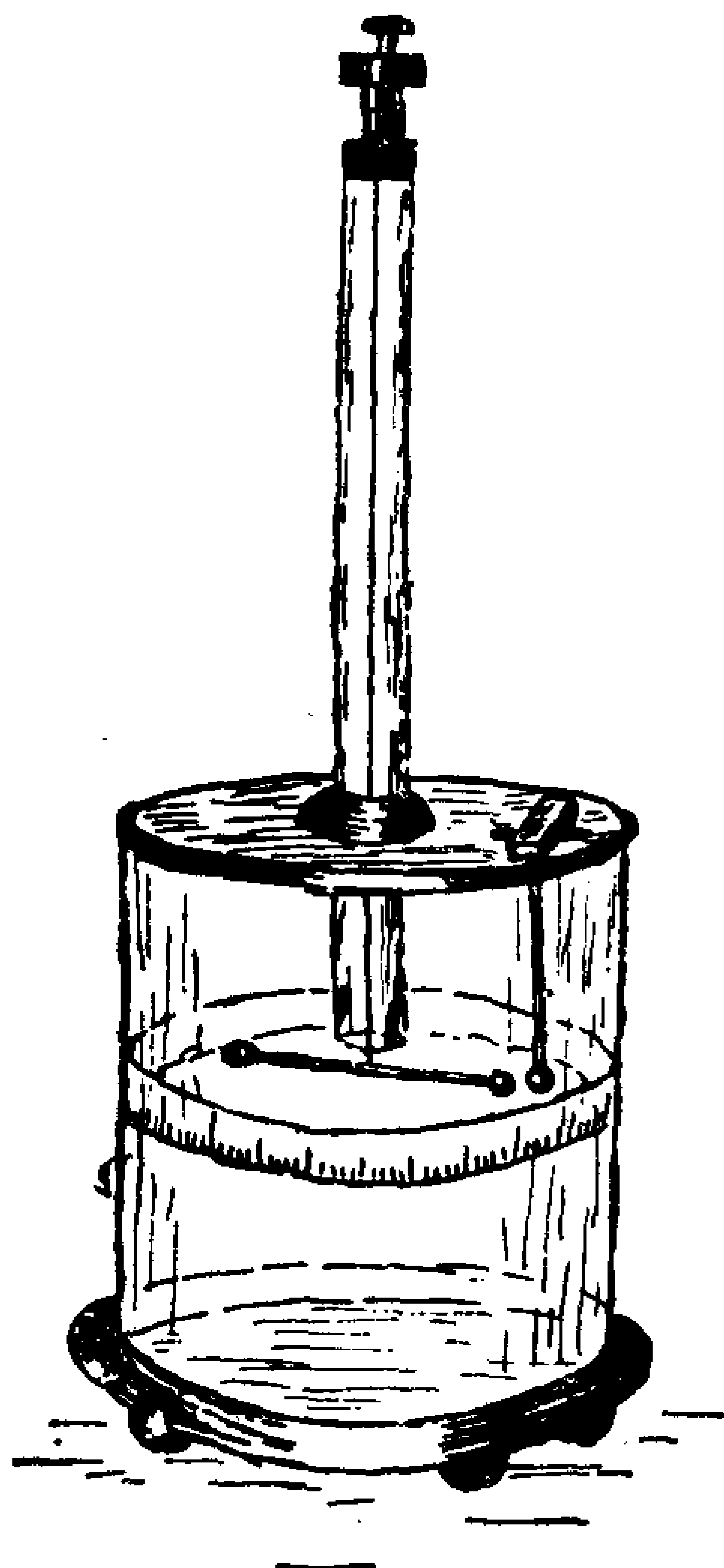


图 V-2 库仑的扭秤

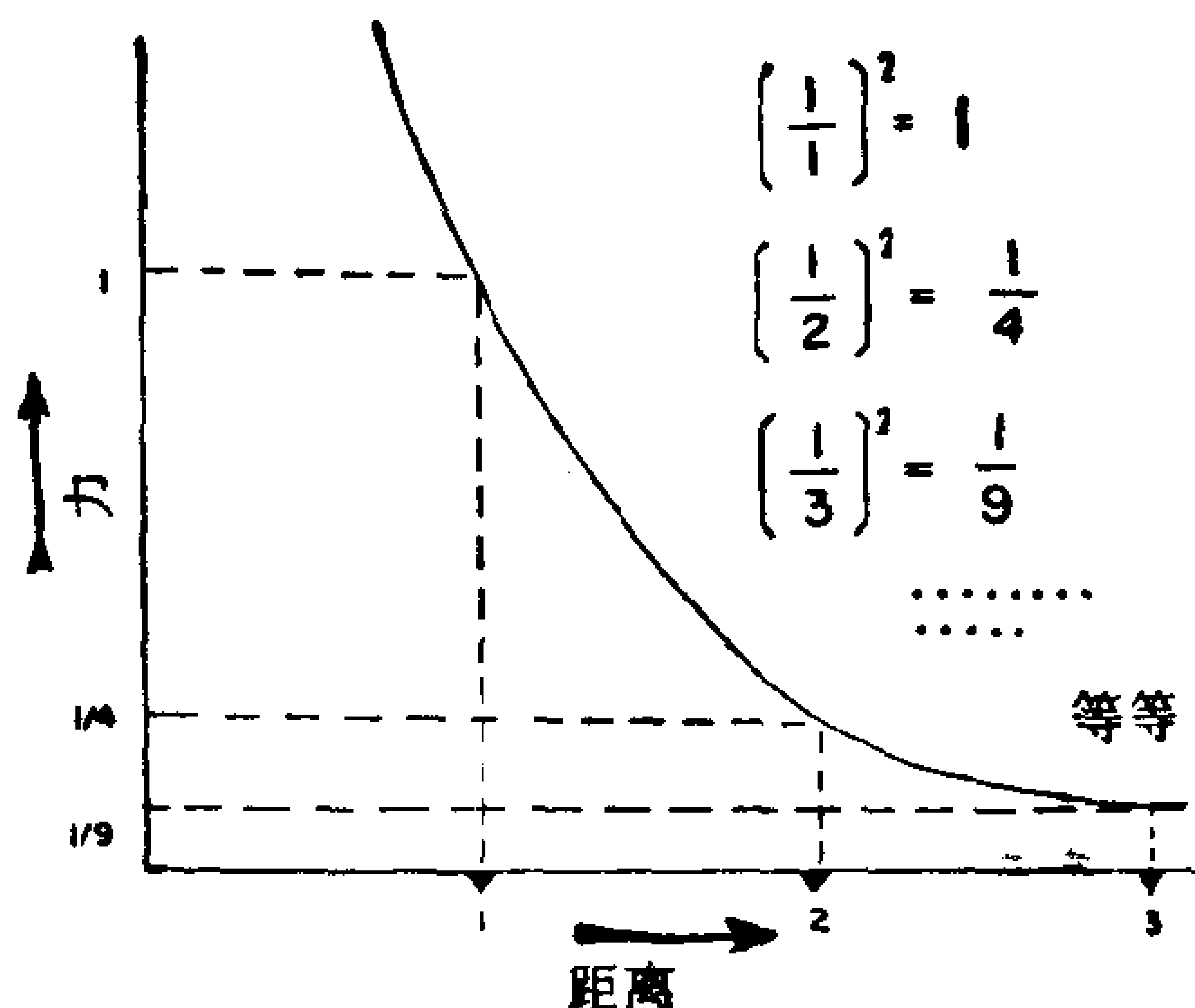


图 V-3 库仑定律图示

用这个定律，可以定义电荷的静电单位，它是这样一个电荷：它对一个相距一厘米远的同样电荷的作用力为一达因。在实际中我们是用一个大得多的电荷单位，叫做库仑，一库仑等于三十亿个上面定义的较小的静电系单位。库仑用同一个扭秤，把一个磁石悬挂在悬线上，通过容器的顶部在垂直方向放上另一个磁石，证明了库仑定律对磁相互作用也是成立的。因此，磁化的单位被定义为这样一个磁极的强度：它以一达因的力吸引或排斥另一个相距一厘

米远的同等强度的磁极。

大约在同一时期，英国住着一位性格很孤僻的人，名叫卡文迪希，他是一位英国贵族的儿子。卡文迪希没有什么亲近的朋友，害怕接近妇女，在他那所座落在伦敦的克莱佛·科曼的宽大宅第中工作的女仆都得听他的吩咐躲着他，不能让他看见，连他如何用餐都是靠他每天留在餐桌上的条子去安排。他对任何音乐和艺术都毫无兴趣，所有的时间都花费在做物理实验和化学实验上，这些实验都是在公馆里设置的私人实验室里做的。只有为了健康的目的按时散步和偶尔参加皇家学会俱乐部的午餐会，以便得到有关其它物理学家和化学家所做工作的情况时，他才暂时中断自己的工作。

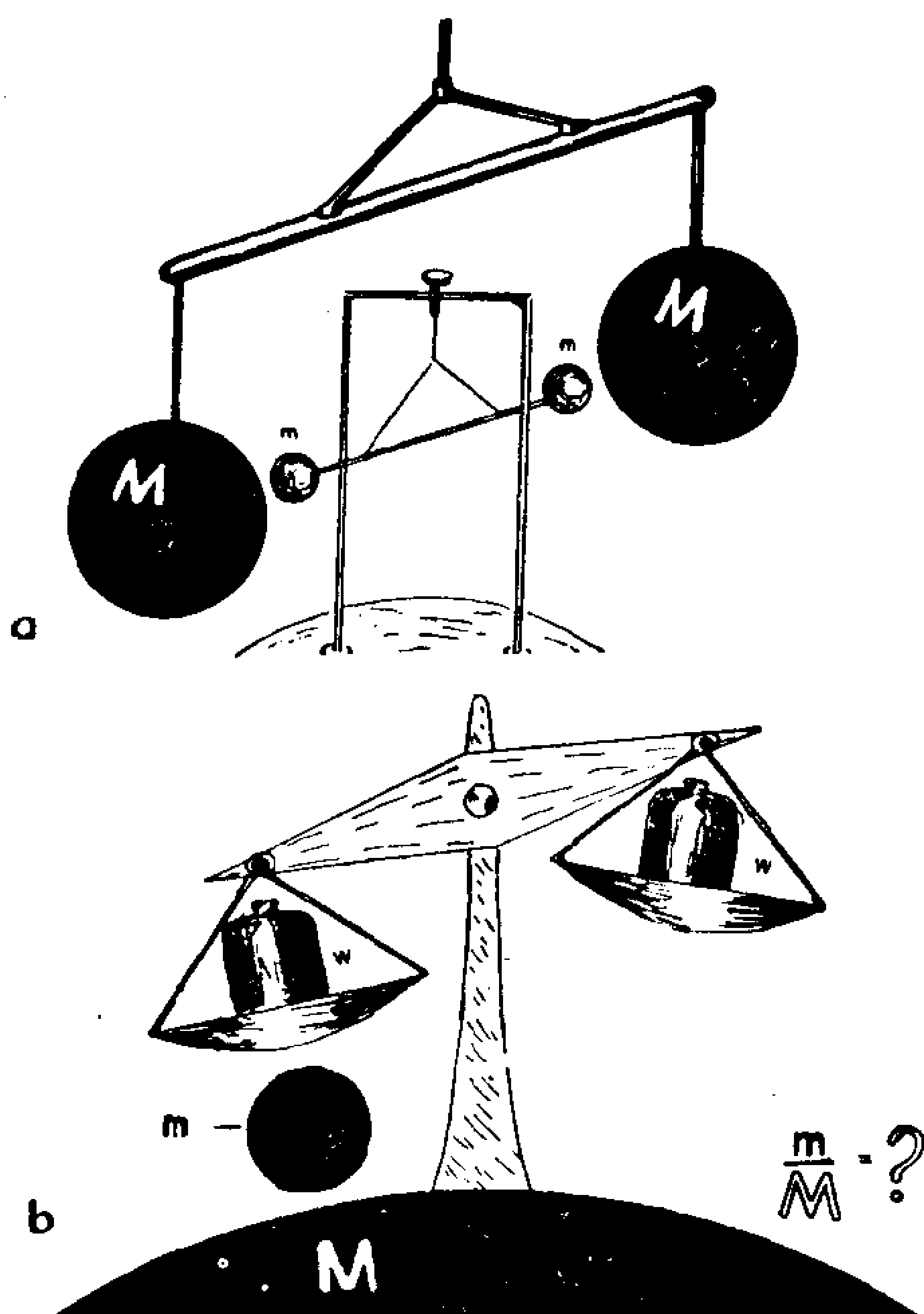


图 V-4　卡文迪希测量万有引力的装置与库仑测量电力的装置相似。若改变悬挂在天花板上的两个大质量M的位置(a)，我们可以观察到悬挂在一根很细的线上的两个小质量m的位移；b)表示改进后的卡文迪希方法。两个重物W起初在地球的引力(地球的质量为M)作用下达到平衡，当我们把另一个质量m放在其中之一的下面时，重物就运动了。

在他漫长的一生中（他去世时 79 岁），只发表了少数几篇不太重要的论文。而在他死后，在他的存折里发现大约有一百万英镑的存款，实验室里有 20 捆笔记。这些笔记在他的亲属手中保

藏了很长时间，当它们在大约100年后发表时，人们才知道卡文迪希原来是有史以来最伟大的实验科学家之一。他与库仑同时发现了电相互作用和磁相互作用的全部定律，他在化学方面的工作可以与拉瓦锡* 比美。此外，他用一种称研究了小物体之间的极其微弱的万有引力，并以这些实验为基础，精确算出了地球的质量（图 V-4)。虽然现在没有什么以他的名字来命名的物理单位，但是剑桥的卡文迪希实验室却是世界上最著名的科学研究中心之一。

电鳗发出的电击

非洲和南美的土人早就熟悉有一种特殊的热带河鱼，当你想要捉它时，它就会狠狠给你一下电击。十八世纪中叶，有一条英国船带了几条这种鱼的样品到伦敦，于是生物学家就开始研究它们。结果发现，只有当你用两手同时去碰鱼的头部和身体下部时，才会受电击。这个事实以及电击的感觉都使人们想起了当时刚刚发明的来顿瓶的效用，所以把这种鱼称为电妖鱼或电鳗。当人们证明了这种鱼能被用来给来顿瓶充电时，就完全相信这种电击只是一种放电现象了。鱼生电的现象引起了意大利生物学家伽伐尼的注意，他当时正在研究青蛙腿的肌肉收缩现象，那时蛙腿是波洛尼亚** 各个餐馆的拿手好菜。他偶然发现(故事就这样开始了)用铜勾子挂在他家阳台铁栏杆上的几只蛙腿在碰到栏杆的铁条时，突然跳动起来，仿佛活的一样。为了“在可控制的条件下”核对一下这个结果，伽伐尼做了一个实验(在他的实验笔记中注明的实验日

* 译注: 拉瓦锡 Lavoisier (1743—1794)，法国化学家。对化学的发展有很大贡献，人称近代化学的开山鼻祖。

** 译注: 波洛尼亚(Bologna)，意大利地名。

期是 1786 年 9 月 20 日)：他用一把叉子，一个叉尖是铜的，另一个是铁的，去碰蛙腿的神经和肌肉。每碰一下时，蛙腿就立即收缩，所以伽伐尼就信以为这和电鳗引起电击是类似的。但是，他这个假设完全错了，他的朋友意大利的物理学家伏打很快就证明了引起蛙腿收缩的电流纯粹是一种无机现象，当我们把两种金属线焊接起来成为一根导线，并将其两端浸入盐的水溶液中时，总是能观察到这种电流的。伏打把这种现象称为伽伐尼电流以纪念他的生理学家朋友，他还用大量铜圆片和铁或镀锌的圆片交替放置，中间再用一层层曾在盐溶液中泡过的布片隔开，制成了一种称为"伏打电堆"的东西。伏打电堆是我们今天用于照明和许多其它设备上的现代电池的原形。1800 年 3 月，伏打送了一份描述自己发现的手稿给伦敦皇家学会发表，因为伦敦皇家学会当时是国际上科学思想交流的中心。他在这篇文章中写道：

是的，我向各位报告的这种仪器，无疑会使你们感到惊奇，它只是许多良导体按一定顺序排列起来的集合，有 30 片、40 片、60 片或更多的铜片，用银片则更好，每一片都镀上锡，或者最好是镀上锌，片与片之间隔以一层水，或者其它比普通水导电性更好的液体，例如盐水、碱水等，也可以使用在这些液体中充分浸泡过的硬纸板或皮革等等。这些夹层插在一对对或一组组不同的金属对之间，交叉放置的顺序总是保持不变，这就是我的新仪器的全部结构。我说过，这是模仿来顿瓶或电池的效用而制成的，可以产生和它们同样的电击。诚然，它比上述电池高度充电时的能力差得多，就放电时所能产生的力、爆炸的声响、火花的大小和放电距离来说，它只相当于一个容量很大而只充电到很低程度的电池；但是除此之外，它的优点和效能是这些电池无法与之相比的，因为它不必象这些电池那样要靠外界的电来预先充电，只要我们一碰它，它就能发出电击，而不管碰它的次数是多么频繁……现在我就要向你们更详细地描述这种仪器和某些类似的装置，以及有关它们的最奇特的实验结果。

伏打电堆原来的设计方案示于图 V-5 中。

后来发生了一件十分不幸的事情。当时负责皇家学会发表工作的卡理斯尔和尼科尔逊两位先生把伏打送来的手稿束之高阁，他们重复了伏打的实验，把实验结果用他们自己的名字发表了。但是，搞阴谋诡计不等于做工作。伏打的研究成果通过其它途径变得尽人皆知，卡理斯尔和尼科尔逊科学上的剽窃行为遭到了谴责，他们从此就消声匿迹了。今天，伏打电堆和电势的单位伏特就是为了纪念这位才能出众的意大利科学家而命名的。“电势”是表征一个带电物体的带电程度的。假定有一大的球形导体带有一定量的电荷，现在想增加它所带的电荷。为此，我们可以用一根绝缘柄从距离大球一定远的地方(理论上讲是从无限远的地方)拿来一个带有一定数量电荷的小球，使它与大球接触。由于两球之间存在库仑斥力，我们必须做一定量的功才能使这两个球接触。使大球的电荷增加一个电量单位所需要做的功，就称为(大球的)电势。如果电荷以库仑为度量单位，功以焦耳为度量单位，电势的度量单位就是伏特。

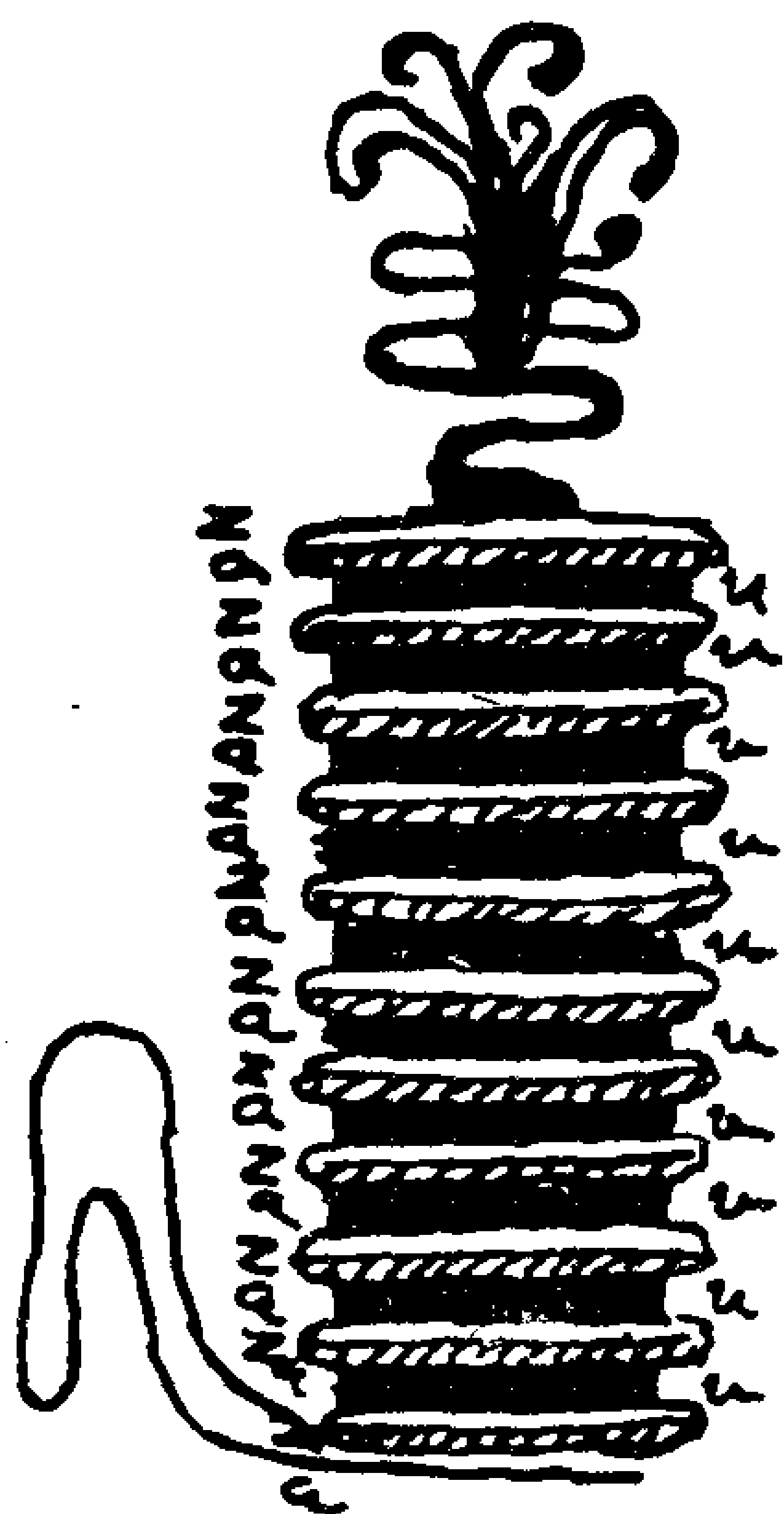


图 V-5 伏打电堆

电 磁 学

尽管早期研究电现象和磁现象的人们一定已经感觉到它们之间存在着某种深刻的联系，但是一直没有能抓住它。电荷对磁铁

丝毫没有影响；磁铁对电荷也没有丝毫影响。发现电和磁之间的联系，要归功于丹麦的物理学家奥斯特，他听到伏打的研究工作后，就自己做了一个电堆，并用它进行了各种实验。1820年，有一天他在去哥本哈根大学讲课的路上，产生了一个念头。如果静电对磁石毫无影响，那么若用一根导线把伏打电池的两极联起来，让电荷在其中运动试一试，事情也许会有所不同。他走进坐满青年学生的教室后，就把他的伏打电堆放在讲台上，用一根白金丝把它的两极联起来，并将一小磁针放在它的附近。磁针原本应该总是指向南北方向，现在却转动了，并在垂直于导线的方向停下来（图 V-6）。听众无动于衷，而奥斯特却激动万分。他在课后就留在教室里，想核对一下他刚刚发现的这个不寻常的现象。起初，他想磁针的运动也许是因为电流使导线变热而产生的空气流所引起的。为了检验这一点，他把一块硬纸板放在导线和磁针之间以阻挡气流。但是毫无变化。然后他把伏打电堆转了180°，使导线中的电流向相反的方向流动。结果磁针也转了180°，磁针的北极指向了原来南极所指的方向。这就使他完全弄清了，磁针与运动电荷之间是有相互作用的，磁针的指向与电流在导体中的流动方向有关。他把有关这个发现的所有事实和观察结果都写了下来，并送到法国杂志《化学与物理学年鉴》

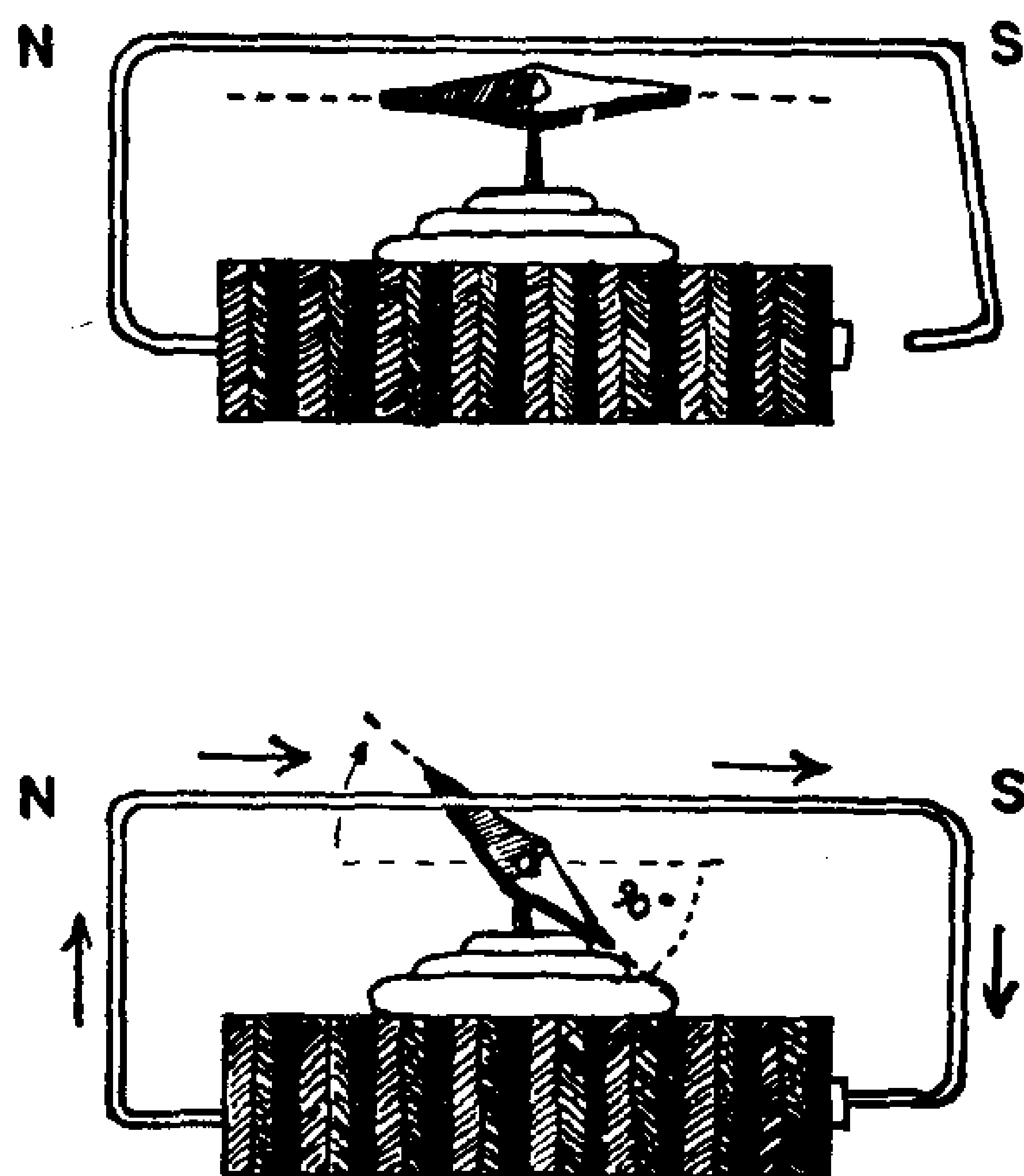


图 V-6　奥斯特发现了电流与磁针的相互作用

去发表。这篇论文在1820年末发表了，同时编者加了如下的说明：

"《年鉴》的读者都知道，本刊从不轻易支持宣称有惊人发现的报告*，至今我们都因为能够坚持这一方针而自许。但是，至于说到奥斯特先生之文章，则其所得之结果无论显得多么奇特，都有极详细的记录为证，以至无任何怀疑其谬误之余地。"

这样，奥斯特称之为"电磁学"的学科就成为现实了！

当奥斯特的发现这一新闻传到巴黎时，引起了法国数学家和物理学家安培的注意，他在短短几个星期内就发现了，不仅电流对磁针有作用，而且两个电流之间彼此也有作用，两根平行载流导体中，如果电流的方向相同，它们就互相吸引，如果方向相反，就互相排斥（图 V-7）。他指出，若用铜线制成一个线圈并使它能绕着一垂直轴自由地转动，则当其中通有电流时，它就完全象一根磁针那样自行指向南北方向，而且两个这样的线圈能够象两根磁棒那样地相互作用。这就使他得出一个观念：天然磁性的产生是由于磁化物体的内部有电流流动。他想象磁性物质每个分子的内部，都自然地包含有一环形电流，从而表现为一个极小的电磁体。当物体未被磁化时，个别分子电磁体在各个方向是杂乱取向的，因而净结果为零。在磁化体中，分子磁体的取向至少部分地是向着一个方向，所以引起它们

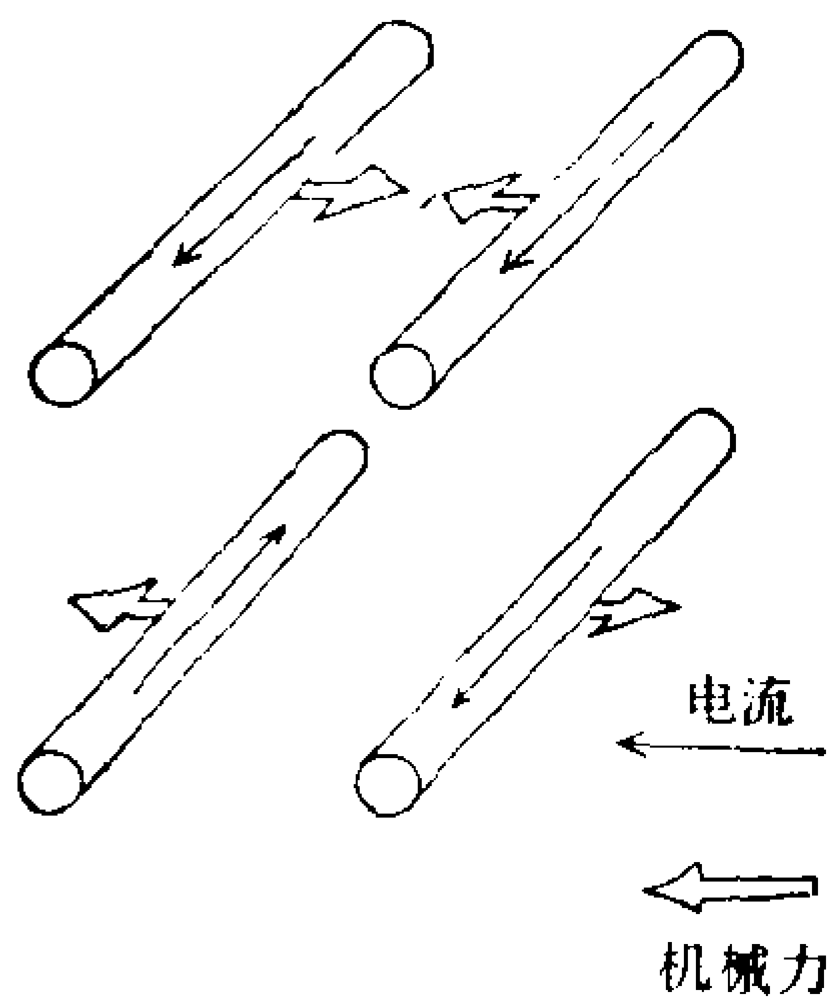


图 V-7　电流之间相互作用的安培定律

* 也许因为其中多数都是一些怪人所写的东西。

之间存在磁吸力或磁斥力的作用。安培的这些观点为现代物理所完全证实,现代物理认为,原子和分子的磁性是由于电子在原子核周围转动或绕着自身的轴迅速自旋而产生的。因为安培首先明确地表述了电流是电荷沿着导线运动这个思想,所以电流的单位就用他的名字来命名。一安培的定义是每秒通过导线横截面的电量为一库仑的电流。

安培是一位有成就的伟大科学家,也是一位典型的心不在焉的教授。据说他讲课时经常用擦黑板的破布去擤鼻子。有个故事说,他有一次在巴黎大街上错把一辆停在街边的两轮马车当成了黑板,在上面写起数学公式来。后来马车走动了,他也跟着走,然后又跟在后面跑起来,一心一意要完成他的推导。有一次,拿破仑·波拿巴特访问巴黎科学院,安培不认识他,拿破仑发觉后笑着说:“你看,先生,一个人不经常见到他的同事是多么不便。我从来也没有在御花园里见到你,不过我知道如何迫使你来,至少迫使你向我说一声‘您好’!”于是他邀请安培第二天到皇宫中赴宴。但是第二天,宫中宴会桌旁的椅子空着,安培早把皇帝的邀请忘掉了!

电流定律

当安培主要的兴趣是在电流引起的磁效应方面时,德国物理学家欧姆却想要弄清楚电流的强度与电流在其中流过的导线材料和维持电流继续流动的电势之间的关系如何。欧姆当时是科伦市一间学校的教师,他用许多伏打电堆串联起来,产生了各种不同的电压,并用了一只首先由安培制成的电流计,使用它能根据电流所产生的磁针的偏转来测量电流的强度。他用不同金属材料制成的不同长度和不同截面的导线,发现电流强度与导线截面成正比,与其长度成反比,且与制成导线的材料有关。他还发现对于任一给

定的导线，若用许多伏打电堆串联起来驱使电流在导线中流过，则导线中的电流强度与电堆两端之电势差成正比。这种情况与我们从一根水管抽水，而水管里塞满了某种玻璃丝阻碍着水自由流动的情形十分类似。在这种情形下，水流的强度也是随着水泵所提供的压强的增大和水管横截面的增大而增大，随着管长的增大而减小，并与塞在管子中阻碍着水自由流动的材料的性质和数量有关*。

这样，欧姆就引入了不同的导线具有电阻的概念，并说，电流强度与产生这一电流的电势差成正比，与导线的电阻成反比，而导线的电阻又与构成导线的材料有关，并与导线的长度成正比，与其截面成反比。1827年，他在一篇题为“伽伐尼电流之数学研究”的论文中发表了他的发现，为以后有关电路的研究提供了基础。欧姆定律可以用两个简单的公式来表示：

$$\text{电流强度}=\frac{\text{电势差}}{\text{导线电阻}}$$

$$\text{导线电阻}=C\frac{\text{导线长度}}{\text{导线截面积}}$$

式中C是一个表征所用的材料性质的常数。为了纪念欧姆，电阻的单位就称为一欧姆，它是一伏特的电势差之下产生一安培电流时的电阻。有时我们不说电阻，而说电导，它与电阻正好相反。相应地，电导的单位称为一欧姆，即将欧姆反过来。图V-8中展示出研究电现象的实验工作中用到的各种电学仪器。

法拉第的发现

米彻尔·法拉第（图V-9）把电磁现象的经典研究推到了顶

* 这个类比是与现代关于导线中电流的观点十分一致的。按照现代的观点，电流是所谓的自由电子流在电压作用下从构成金属的密集原子中挤过去的结果。

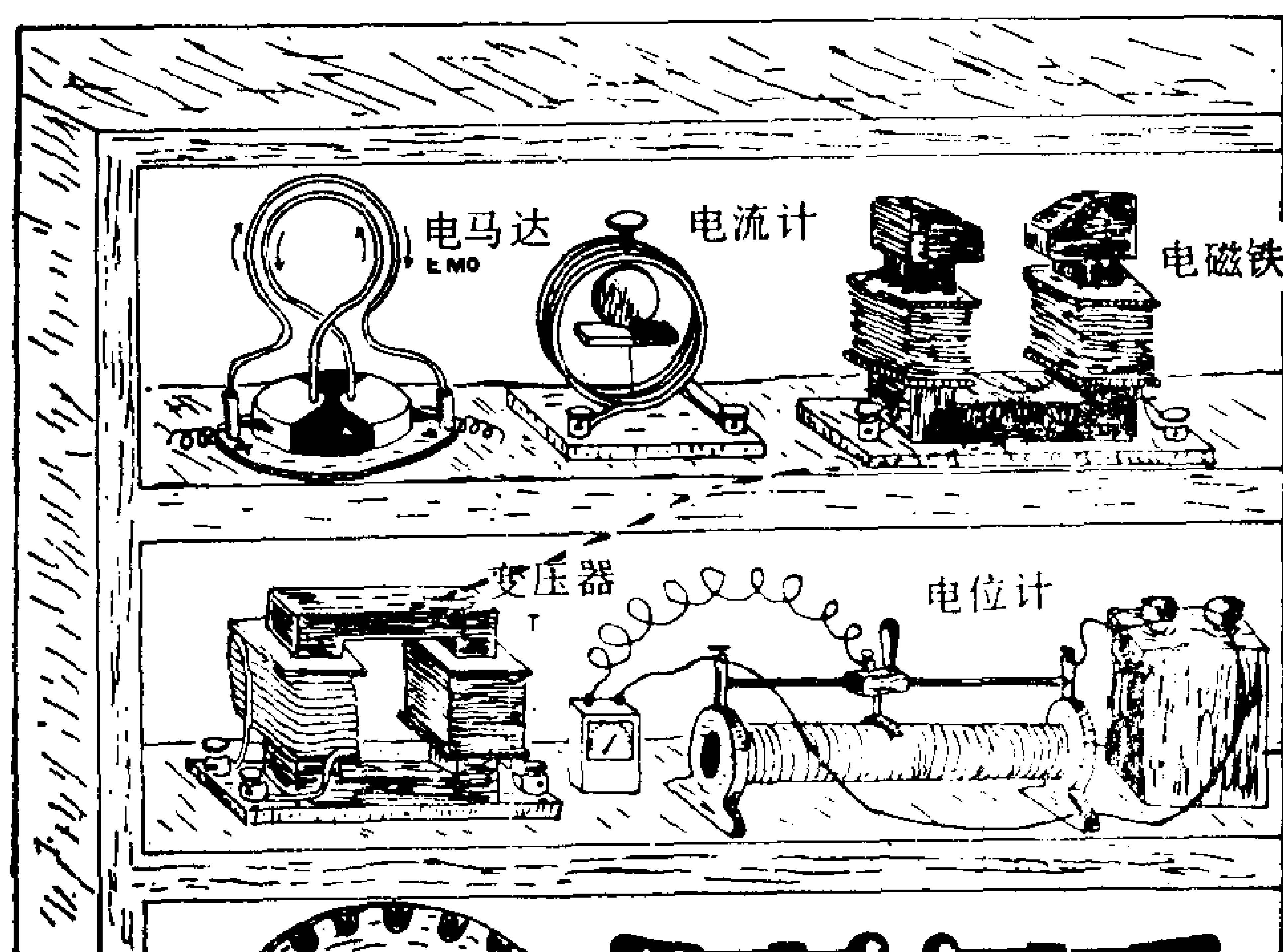


图 V-8　各种电学仪器

电马达：电流沿相反方向通过两根环形导线，一根导线可动，一根固定不动。由此产生的安培斥力使可动的导线绕着轴线转动。但由于底盘上滑动的接触装置，电流方向可以换向，所以导线可以不断转动下去。

电流计：当电流流过线圈时，悬在细线上的小磁针便偏离其正常位置。电流越强，偏转角越大，偏转角可通过从一小镜反射回来的光束测出。

电磁铁：当直流电通过线圈时，在两极之间出现很强的磁场。

变压器：当具有一定电压的交流电通过圈数很少的线圈（左边）时，在用细导线绕成的圈数很多的线圈（右边）中就会出现电压高得多的电流。

电位计：从电池流出的电流通过一可变电阻器。用一导线与滑动触点相联，左右移动滑动触点就可从它得到不同的电压。

峰，从而开辟了我们今天称之为"现代物理"的新时代。他在1791年生于伦敦附近一个铁匠的家庭里。因为家里太穷，无法供他上学，所以他在十三岁时就开始作事了，在一个名叫瑞包的人经营的书店里当小听差。一年后，瑞包先生让他当学徒，做装订工，期限是七年。法拉第不仅在装订送到店里来的书，而且从头到尾读了很多书，这激起了他对科学的浓厚兴趣。法拉第是这样描述他的青年时代的：

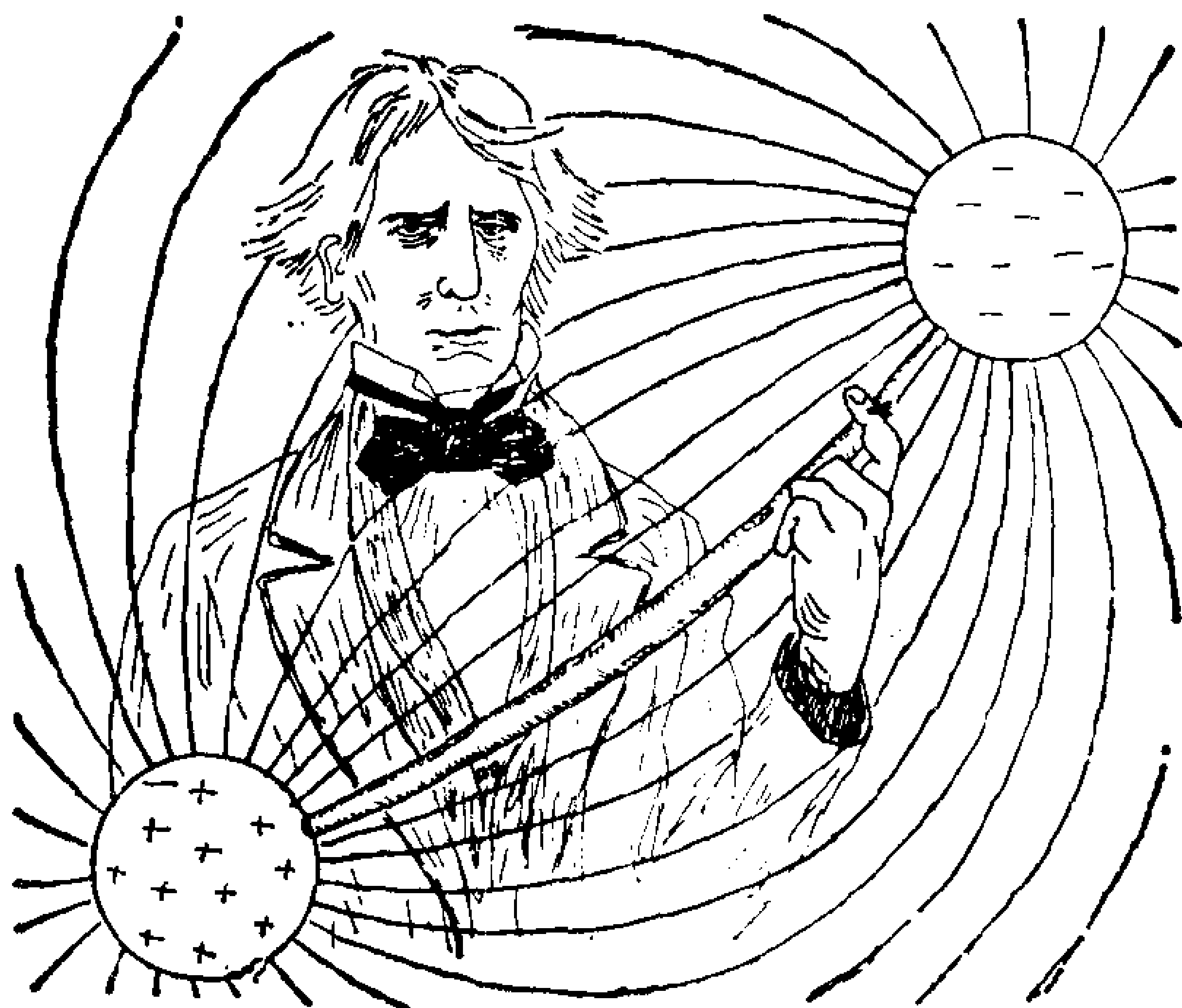


图 V-9 米彻尔·法拉第和他的管线

在当学徒的时候，我爱看手边的科学书，其中最爱读的是马斯特的《化学对话》和《大英百科全书》中的电学论文。我做了一些花费得起的简单实验，每星期花上几个便士，还制成了一种电学机械，起初用小玻璃瓶，后来就用真正的金属圆筒以及其它这类的电学仪器。

在他学徒生涯的最后一年，刚过二十岁（当时伽伐尼和伏打的发现仍是最新的新闻），他给他的老朋友爱伯特写道：

"我最近做了几个简单的电学实验，不过是为了借以证明最基本的科学原理。我曾到爵士那里想搞一些镍，后来又想他们还有韧锌。我提出了要求，结果买到了一些——你曾见过那些东西吗？我起初得到的是一些很小的碎块，看来毫无光泽。他们告诉我，这些碎块足够用来做"电棒"或是象我以前所说的德鲁克电柱了。我弄到它是为了切成圆片，用它们和铜片来做成一个小电池。第一次我竟做成了七个片子之多！每一片的大小各与一枚半便士的钱币那样大！！！

先生，是我自己把这七个片子切成了和半便士的钱币那样大的圆片的。

先生，我把它们覆盖于七枚半便士的铜币上，中间隔了七层（确切地说应是六层）在食盐水浸过的纸板！！！但是不要见笑，亲爱的爱伯特，你得对这平凡的机构所产生的结果大感惊奇。它足以能使硫酸镁分解，这个结果使我极为吃惊，因为我没有也不可能想到它竟能产生这样的功效。这时我突然产生了一个想法；我就要告诉你，我用铜线使电堆的两端和硫酸镁溶液之间形成了通路。你能相信吗？就是铜把我放在溶液中的一块块的硫酸盐分解了！我相信这里发生的是一种伽伐尼效应，因为两根导线上很快就盖满了某种气体的气泡，而且有一连串象微粒似的小气泡从负线流过溶液。我证明硫酸镁被分解的根据是，在大约两个小时以后，清澈的溶液变得混浊了：因为有镁悬浮在溶液中。

这就是用电流方法来进行化学分解的发现，法拉第称之为电解。法拉第对这个现象进行了几年的研究后，发现了两条基本定律，现在称之为法拉第定律。法拉第第一定律说，对一给定的溶液，在电极上沉淀（或析出）的物质的数量，与通过溶液的总电量（即电流强度乘以时间）成正比。这意味着带电的分子（后来称为离子）带着电通过溶液时是具有严格确定的电量的（图 V-10）。

根据法拉第第二定律：不同物质的同价离子，也带有相同的电量，两价、三价等等的离子则相应地带有两倍、三倍……的电荷。这证明存在一个通用的电荷单位，在法拉第的时代只知道它是附属于各种原子的，而后来发现它所取的形式是飞越空间的自由电子。

但是，尽管法拉第发现了电解现象，他还是不得不去找工作做，因为他在书店里的位置还有几个月就要满期了。他最大的愿望是和戴维爵士一起工作，戴维当时是大名鼎鼎的化学家，法拉第当学徒的时候曾听过他的讲演。法拉第恭正地抄写好听戴维讲演的笔记，附加上精美的插图，把它们精装成册，然后连同一份请求到他实验里工作的申请书送给了戴维爵士。当戴维去向大英皇家

学会的负责人之一——这个人是学会的一位总监——谈关于雇用这个年轻的装钉工的意见时，总监答道："让他涮瓶子吧！如果他有点用处他就会答应干；要是他不干，就说明他毫无用处。"

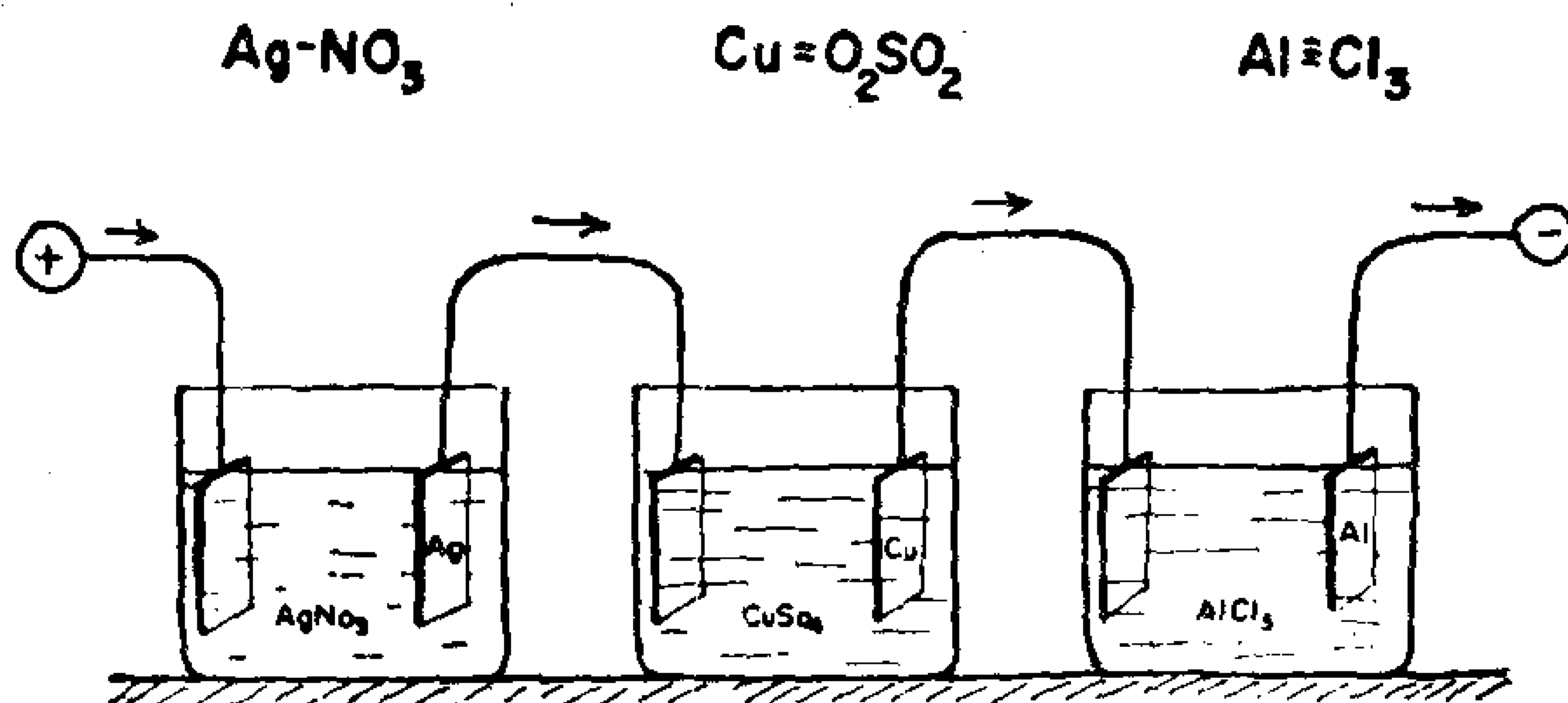


图 V-10 法拉第电解定律的演示。如果我们让电流通过硝酸银、硫酸铜和氯化铝的溶液，就会有金属沉淀在负电极上。金属沉积的总量被发现是与通过的电量成正比的（法拉第第一定律）。此外还发现，如果沉积的银是 108 克（银的原子量），则沉淀的铜只有 31.9 克（铜的原子量的一半），而沉淀的铝就只有 9 克（铝原子量的三分之一）。因为通过这三个容器的电量相同，故可得出结论：铜离子所带的电荷是银离子所带电荷的两倍，铝离子所带的三倍。这正好与这三种金属的化学价相符，从图中上方它们的分子式便可看出这一点。这就是法拉第第二定律。

法拉第答应了，并且在他一生剩下的四十五年中一直留在皇家学会工作，起先是当戴维的助手，后来成为他的合作者，最后，戴维去世后成了他的继任者。

除了在科学期刊上发表的大量文章外，法拉第在研究工作上最值得注意的文件就是他的日记；他从 1820 年到 1862 年从未中断过记日记，皇家学会新近（1932 年）出版的法拉第日记计有七大厚卷共 3236 页之多，还附有几千幅插图。这里我们从日记中引出几段法拉第自己对电磁感应现象的描述，这个现象大概是他最重要的发现了。

1831年8月29日:

1. 关于磁生电的实验等等，等等。

2. 做了一个圆铁环(用软铁)，7/8英寸厚，环的外径是6英寸。(图V-11)铁环的一半绕上许多铜线圈，线圈之间用麻线和白布隔开，其中共有三根导线各长24英尺左右，它们可以接成一根，也可以三根单独使用。用电池试验时，这三根导线彼此之间是绝缘的，我们称环的这半边为A。隔开一定距离，在另一半绕有两根导线，共长60英尺左右，绕线方向与上述线圈相同，这半边称为B。

3. 给一电池充电，电池有10对面积为4平方英寸的电极。把B边的线圈连接成一个线圈，并将其两端用一铜线相连，铜线经过一段距离(离铁环3英尺)刚好越过一只磁针。然后把A侧的一个线圈与电池接通，立刻就对磁针有明显的影响。磁针摆动，最后又停在原来的位置上。断开A侧线圈与电池的连线时，对磁针又有影响。

这样，一个线圈中的电流在另一个放在附近的线圈中可以感生出电流来，正向一个物体上的电荷可以引起另一个附近物体的电极化一样。但是，电极化过程是一种静态的效应，只要两个物体仍然是彼此靠近的，它就可以持续下去，而电流的感应则是一种动态过程，第二个线圈中的电流仅仅在第一个线圈中的电流从零增大到正常值或从正常值减小到零的过程中才存在。

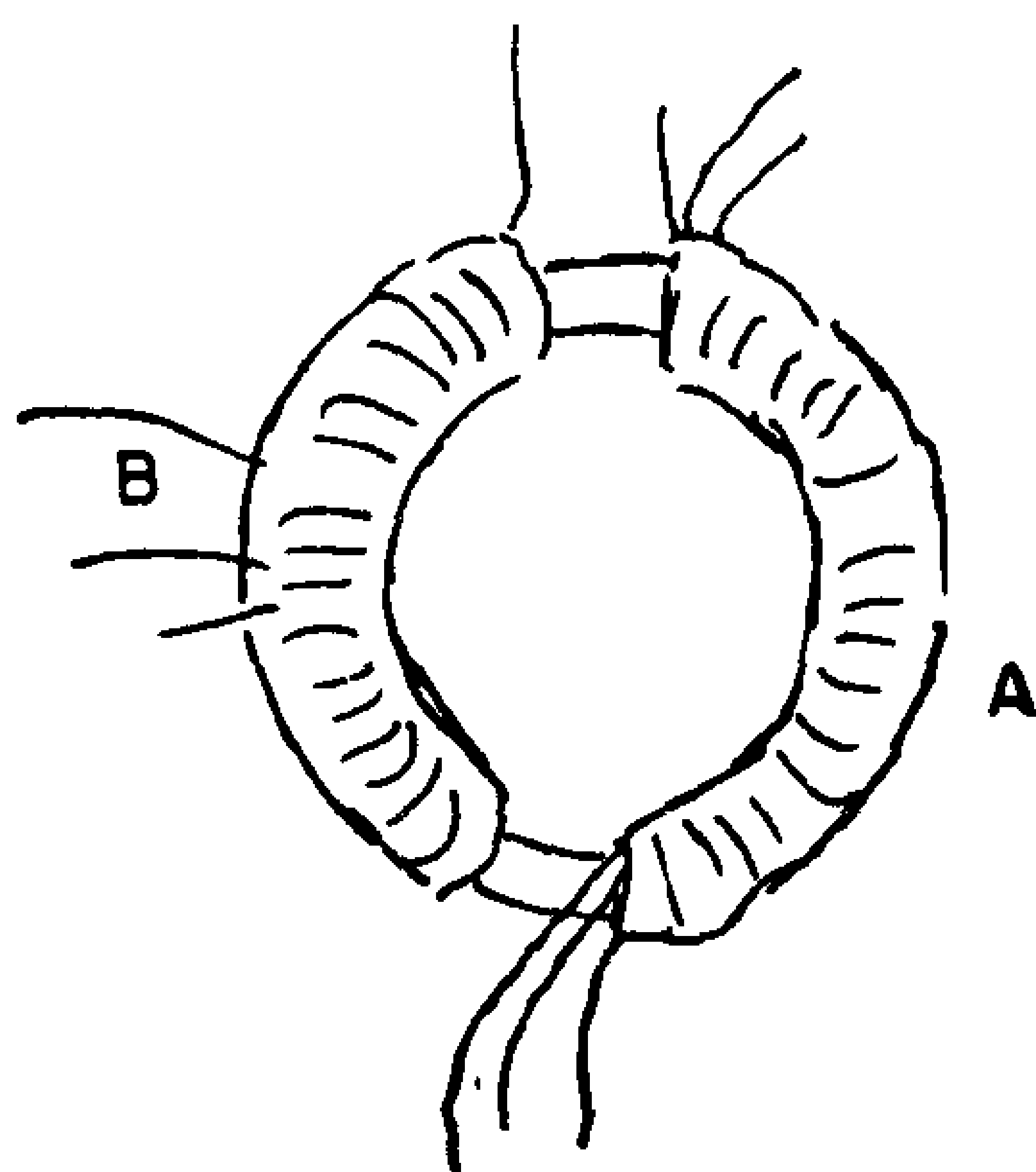


图 V-11、法拉第日记中的插图，说明他对电磁感应现象的发现。线圈A中出现电流或电流消失时，在线圈B中就感应出短暂的电流。

在这个划时代的发现提出之后不到三个月，法拉第又在研究电和磁的关系方面迈出了重要的一步。根据他的日记，当时他是

这样做的:

1831年10月17日:

56)做了一只空心纸筒,用铜线在外面绕了8层螺旋线,其绕向都相同,各层的长度如下:

第一层即最外层:	32英尺10英寸
第二层	31英尺6英寸
第三层	30英尺
第四层	28英尺
第五层	27英尺
第六层	25英尺6英寸
第七层	23英尺6英寸
第八层即最里层	22英尺

共计 220英尺 引出线除外

各层之间均用麻线和白布隔开。纸筒的内直径为 $\frac{13}{16}$ 英寸,外直径为 $1\frac{1}{2}$ 英寸,铜螺线管(当作圆筒看)的长度为 $6\frac{1}{2}$ 英寸。

57)关于0的实验。把纸筒一端螺线管的8个接头擦净并紧连在一起,另一端的8个接头也照此办理(图V-12)。然后把这两组线头用长铜线接到一检流计上,再将一条长 $8\frac{1}{2}$ 英寸、直径 $\frac{3}{4}$ 英寸的圆柱形磁棒的一端从螺线管的一端插入,并很快推进整个管中,检流计指针就摆动了,再把磁棒抽出时,指针又有摆动,但摆动的方向相反。每当磁棒被推进或拉出时,这个结果就重复出现。因此,电的这一波动之所以能产生,仅仅是由于磁石的接近(或远离),而不是由于磁石本身的结构。

58)指针并不继续偏转,而是要回到它原来的位置。如果运动的顺序和上一实验中相反——运动的方向仍与上一实验一致——这就是说,指针总是有变得与激励磁石相平行的趋势,并处在线圈的同一边,而同名磁极的方向相同。

59)当8个螺线管接成一个长螺线管时,对检流计的影响不如以前那样强烈,可能不到一半强。所以最好是拆开,把它们最后并联起来。

60)当8个螺线管中只用一个时,效果最小——几乎觉察不到。

这再次表明,线圈中的电流感应是一种动态现象,仅仅当磁石

被推进或拉出线圈时才有电流产生。在法拉第的时代，磁生电流及至电流生磁的观念还是一种空想，许多物理学家都力图观察到这种效应，但他们由于总是和静电感应现象类比而被引入了歧途。他们仅仅试验了磁石和导线的静态配置，例如将一磁棒用一根导线绕起来，当把导线的两端引到一起时，它们从来也没有产生过什么电火花。正是由于法拉第的天才，也可以说是由于他日以继夜地进行的大量实验，人们才弄清楚了电流的产生是一个动力学过程，它或者需要有另一电流的强度发生变化，或者需要有磁石的位置发生变化。别的物理学家中只有一位也有过这个观念，他是一位美国人，名叫亨利，但是他踌躇了很长时间才发表，以致这个发现的居先权终于给了大西洋彼岸的法拉第。

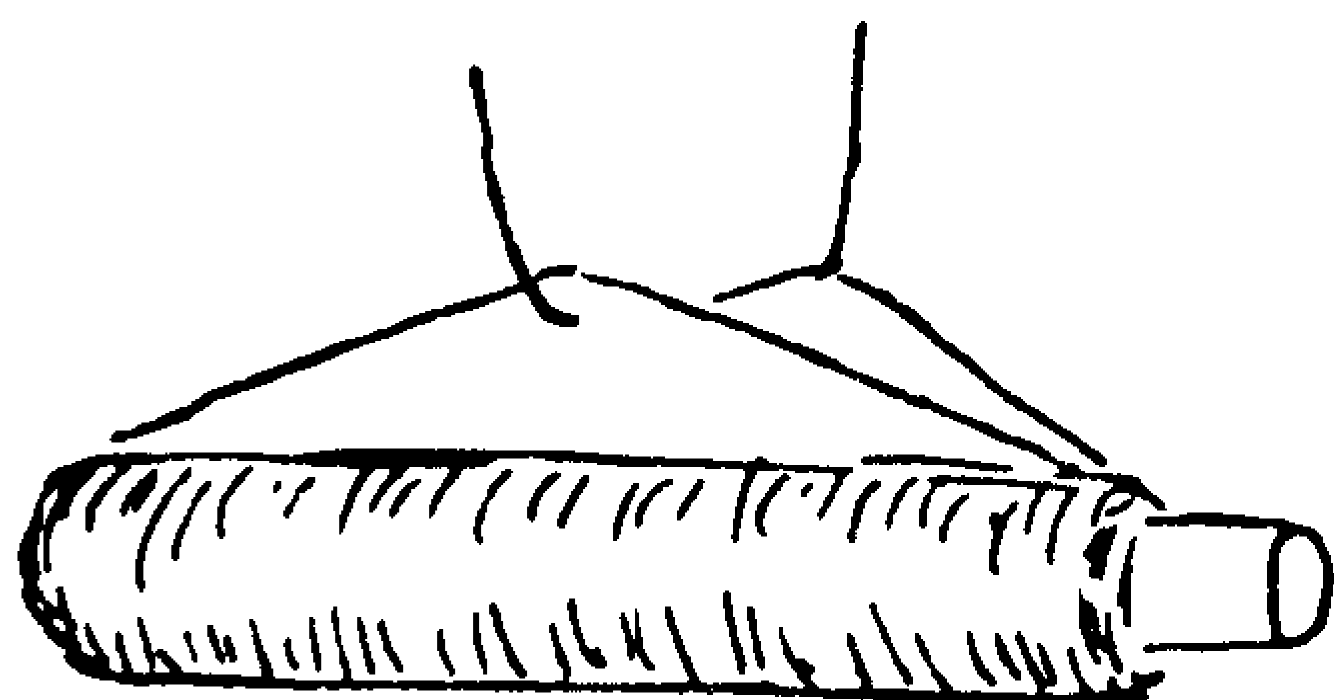


图 V-12　法拉第日记中的图，说明当磁体向线圈推入或从线圈拉出时，线圈中会感应出电流的实验。

法拉第那颗喜欢追根问底的心，并没有中止去继续解开电和磁之间的关系之谜。他还想知道磁能否影响光学现象。这个努力最后以发现光的偏振面在光通过置于磁场中的透明物质时要发生旋转而达到顶峰（见本书第 85 页）。这里我们仍然让法拉第自己来叙述这个发现吧：

1845年9月13日：

7498）今天研究了磁力线通过不同物体（在各个方向都是透明的）的情形，我同时让一偏振光线通过这些物体，而后用尼考尔棱镜或其它方法来检查这一光线。用的磁石是电磁石，其中一个就是我们的圆柱形大电磁石，另一个是临时用铁心插入一个绕在框架上的螺线管而成，它远不及前者那么强。我把

五只格鲁夫式电池的电流同时送过这两个线圈，并用接通或断开电流的办法使这两块磁石生磁或断磁。

法拉第让偏振光线通过空气和几种其它物质并描述了这几种情况产生的否定结果之后，在同一天的日记中写道：

7504)重玻璃

我用一块2英寸长、1.8英寸宽、0.5英寸厚的重玻璃(即硅硼酸铅)，并将其两个短边磨光来做实验。当同名磁极或异名磁极放在(偏振光线进行方向的)两边或者同名磁极放在同一边时，无论是用不变的电流或是用间歇的电流，都不产生什么影响。而当异名的磁极放在同一边时(图 V-13)，它们对偏振光就产生了影响，这证明磁力和光彼此是有联系的。在研究自然力的这两方面时，这个事实也许是最有意义最有价值的了。

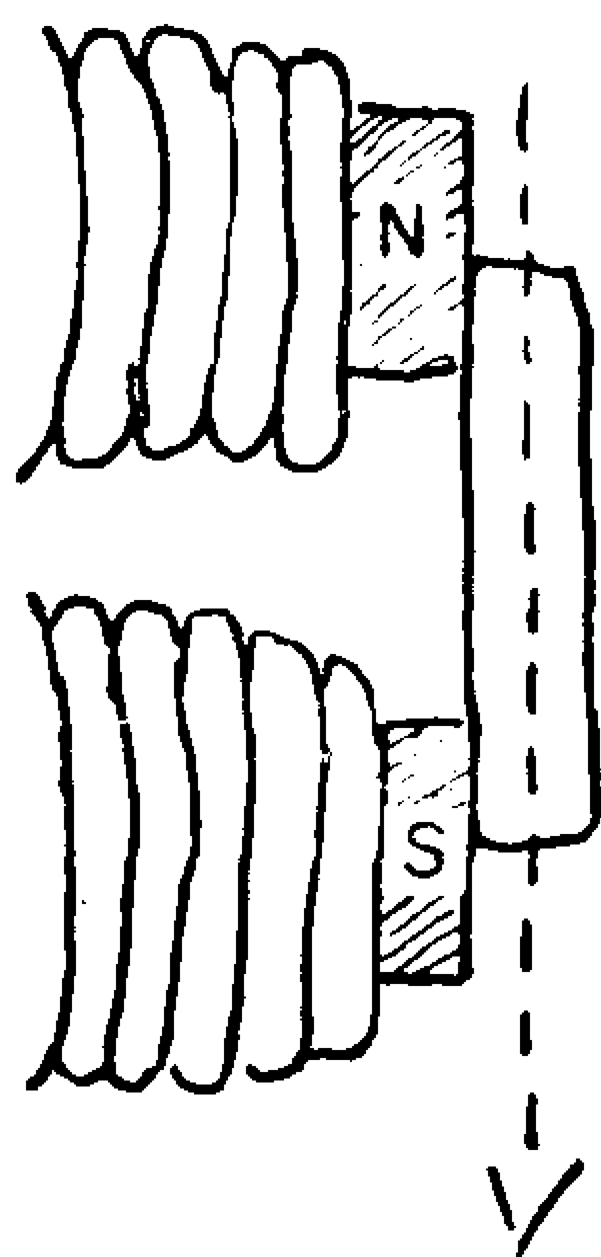


图 V-13 法拉第日记中的插图，说明他发现的磁场对光的影响。当偏振光沿着磁力线的方向传播时，偏振面就转过一个与磁场强度成正比的角度。

确实如此！“法拉第效应”或光沿磁力线传播时偏振面的旋转说明光波(它们是波长极短的电磁波)与个别原子中的电流之间有着密切的联系。这些微电流的存在首先是由安培提出的(见本书第132页)，今天认为它们是由于原子中的电子绕着中央的原子核转动而引起的。试考虑将两个完全相同的原子放在磁场中，其中一个的电子沿顺时针方向转动，另一个沿反时针方向旋转(图 V-14)。在前一情况下，磁场加于运动电子上的力是指向原子核；而后一情况下的力是指向相反方向。这样，前一种情况下电子轨道的直径要缩小，它的转动频率则要加大，而后一

种情况正相反。顺时针和反时针的原子内部电流这一情况上的差别，就会影响电磁波（光）在物质中的传播，可以证明，其结果就是法拉第所观察到的偏振面旋转。

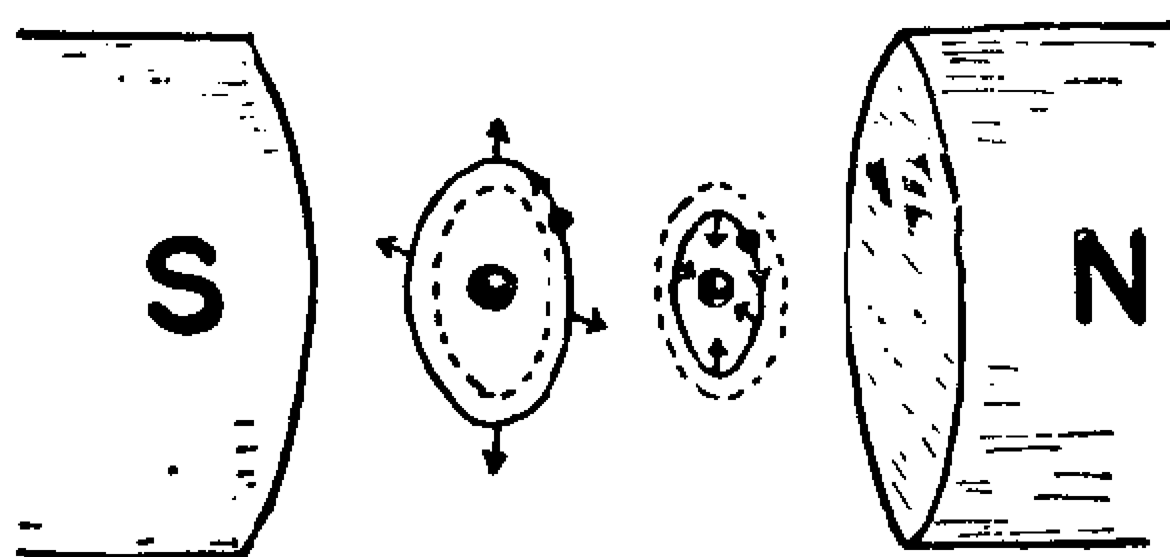


图 V-14　法拉第效应的解释。原子中的电子在磁场中运动时，作用在它们上的磁力与这一运动的方向有关。在反时针转动的情况下（左边），作用力使轨道半径增大，而频率减小。在顺时针转动情况下（右边），作用力使轨道半径减小，频率增大。在与光相互作用时，这两种类型的电子运动使偏振面发生了旋转。

法拉第认为，在物质世界中观察到的一切现象都一定是以这种或那种方式互相联系着的，所以他还试图确立电磁力与牛顿引力之间的关系。1849 年他在实验日记中写道：

> 重力。这种力与电力、磁力和其它力的实验关系一定能够找出来，从而通过相互作用和等价的效应用它们来确定它。考虑了一下如何用事实和试验着手解决这个问题。

但是，他为了发现这一关系而进行的大量实验都失败了，他用这样的话结束了这一部分日记：

> 现在我的试验就到此为止。结果是否定的。但它们并没有动摇我的坚强信念，即重力和电力之间一定是有关系的，尽管它们未能证明这一关系的存在。

一个世纪以后，另一位天才爱因斯坦绞尽脑汁几十年之久，企图建立一个所谓的“统一场论”，把电磁现象和重力现象联系在一起。但和法拉第一样，爱因斯坦终身未能完成这项工作。

电 磁 场

法拉第的实验发现给人的印象是极其深刻的，这些发现与他的理论观念也完全相称。法拉第只受过很少的教育，实际上也不大懂数学，所以他不能称为人们常说的理论物理学家。但事实上，为了在一个错综复杂的物理现象中想出一幅理论图象，复杂的数学知识往往是完全不必要的，有时甚至是有害的。探索者也许会在复杂公式的密林中迷失方向，就象俄国的谚语说的："只见树木，不见树林。"在法拉第之前，电力、磁力以及重力常被看成是一种通过虚空空间的作用，它超越相互作用的物体。但是，按照法拉第的简单想法，这种"超距作用"看起来毫无物理意义，当他看到一个东西从一处运动到另一处时，他还想看到牵动它的绳子或者拉动它的棍棒。因此，为了具体地设想电荷和磁石之间的作用，他曾想象在它们之间的空间中充满了能够拉或推的"某种东西"。他谈到了某种类似于胶皮管之类的东西，它们在两个相反的电荷或磁极之间张开(图V-15 a)并把它们拉在一起。而当电荷或磁极的符号相同时，这种类似胶皮管的东西就向各个方向伸出(图 V-15 b)并把它们推开。当我们把磁石放在一块玻璃板上，在板上撒一些细小的铁屑时，就可以探测到这些法拉第管的方向。这些铁屑将会被磁化，并且它们都指向沿着这些管子作用的磁力的方向，形成如照片 III 所示的式样。在电场的情况下，利用电极化可以得到类似的结果，但实验比较难做些。按照法拉第的想法，这些电和磁的管子也是产生各种电磁现象的原因。当电流在电线中流过时，电线的周围就会被一些环形的管子所包围(图V-15 c)，它们能牵动磁针，使它们指向适当的位置。当导线相对于磁体运动（或是反过来）时，它就切割这些磁管(图 V-15 d)，结果就在其中感应出电流。

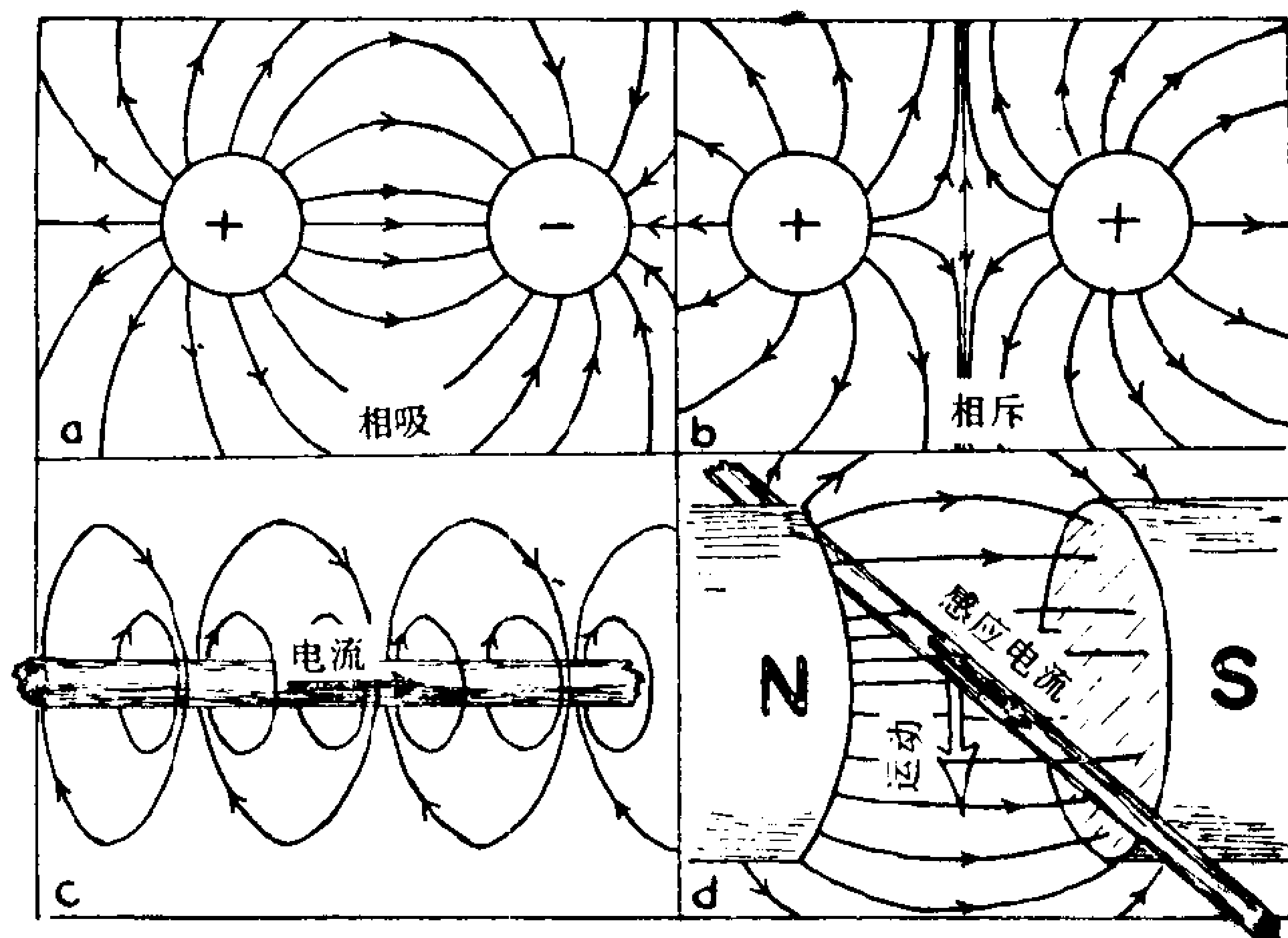


图 V-15 不同类型的电磁相互作用所对应的法拉第线：a)两个相反电荷之间的电力线。b)相同电荷之间的电力线。c)载流导线周围的磁力线。d)经过磁力线运动(运动方向如白色箭头所示)的导线中所感生的电流。小黑箭头表示力线的约定方向：从正电荷指向负电荷，从北极指向南极。

法拉第的这些观念都是比较朴素的，在很大程度上是定性的，但是它们在物理学发展中标志着一个新时代。物体之间超距作用的神秘的力，被连续分布在它们之间及其周围的整个空间中的“某种东西”所代替了，这种东西可在空间任意一点上都能被赋予一个确定的数值。这就在物理学中引进了“力场”的观念，简言之即是“场”的观念，对电力、磁力或引力相互作用都是如此。中间由虚空空间隔开的物体之间的作用力，现在可以看成是它们周围的场之间的“近距离”相互作用的结果了。

给法拉第的观念建立定量的数学形式体系的任务落到了一位著名的苏格兰人的肩上，他的名字是麦克斯韦(图 V-16)。麦克斯韦生于爱丁堡，正好是在法拉第发表他的电磁感应发现两个月之

后。与法拉第完全不同，麦克斯韦是一位极优秀的数学家。他十岁的时候就进入了爱丁堡学术院的学校，因此不得不花很多时间去学习希腊文那些不规则的动词以及其它各门“人文科学”。但是他反而在数学上有所成就，按照他自己的说法，他在数学上最初的成就是“作成一个四面体，一个十二面体以及另外两个我不知道确切名称的多面体”。十四岁的时候，他由于写了一篇文章说明如何用大头针和线作一条正确的椭圆曲线而荣获学术院的数学奖。几年后，麦克斯韦给皇家学会送去了两篇论文，一篇的题目是“关于旋轮线* 的理论”，另一篇是“论弹性体的平衡”。这两篇论文都是由别人在学会宣读的，因为“不宜让一个穿甲克衫的小孩子登上这里的讲坛”。1850 年，麦克斯韦十九岁的时候，他成为剑桥大学的学生，四年后取得了学位，并于 1856 年担任亚伯丁县玛利亚学院的自然哲学讲座教授。他在那里一直呆到 1874 年，后又被请回剑桥，担任新创立的卡文迪希实验室第一任负责人。



$$\mathrm{div}\,\overline{E} = S\ ;\quad \mathrm{div}\,\overline{H} = 0$$

$$\mathrm{curl}\,\overline{E} = -\frac{1}{c}\frac{\delta \overline{H}}{\delta t}$$

$$\mathrm{curl}\,H = \frac{1}{c}\frac{\delta \overline{E}}{\delta t} + S\frac{\overline{u}}{c}$$

图 V-16 韦克斯韦和他的电磁场方程

虽然麦克斯韦早年的兴趣完全是在纯数学方面，但他很快就对于把数学方法应用于各种物理问题发生了浓厚的兴趣。他对热的分子动力论作过很重要的贡献(见第四章)，但是毫无疑问，他重要的工作乃是给法拉第关于电磁场的本质和规律的种种观念建立了一个完整的数学形式体系。麦克斯韦把变化的电场能在导体中

* 译注：即摆线，是数学中一种特定的曲线。

产生电动势和感应电流而电流又能产生磁场这些经验事实加以推广，写出了今天以他的名字来命名的一组著名的方程，它们把磁场的变化率和电场的空间分布以及电场的变化率和磁场的空间分布联系起来了。利用麦克斯韦方程并知道磁化物体、带电导体和电流的分布后，我们就能算出它们周围电磁场的详细结构及其随时间的变化。麦克斯韦证明了，虽然电场和磁场常常是“停泊”在带电体和磁化物体上，但它们也能以自由电磁波的形式在空间存在和传播。为了弄清楚这一点，让我们来考虑两个球形导体，其中一个带正电，另一个带负电(图 V-17 a)。在这两个球体的周围空间中存在着静电场，它储存着电荷的电能，这就象一根被压紧的弹簧存储着机械能一样。若用导线把两个球连接起来，就会有电流从一个球开始流向另一个，而它们的电荷以及它们周围的电场很快就开始减小(图 V-17 b)，最后则完全消失(图 V-17c)。然而，流过导线的电流将在导线周围产生磁场，当电场变为零时，体系的全部能量就储存在这个磁场中。但是过程到此并未结束，导线中的电

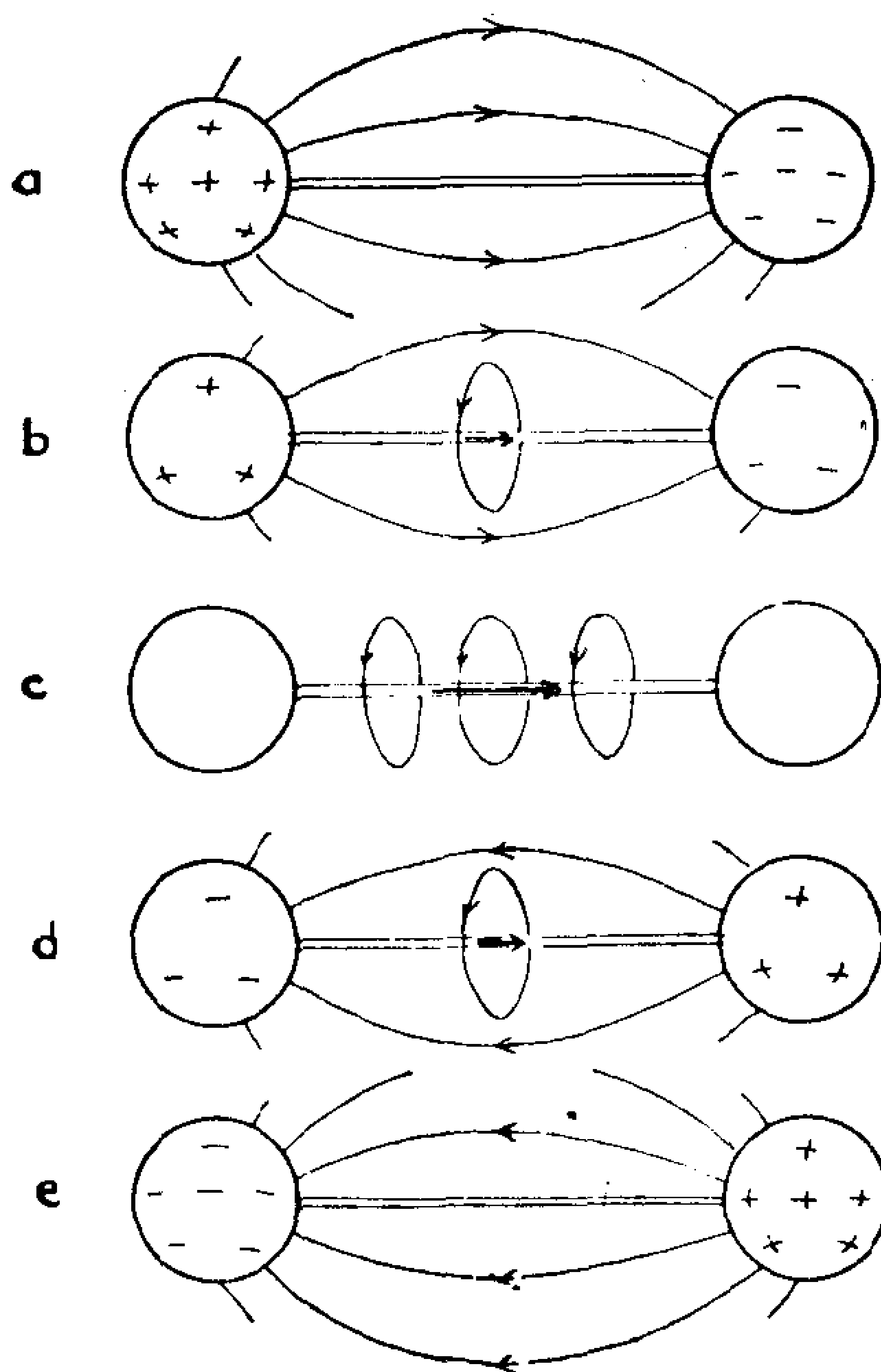


图 V-17　两个导体之间的电磁振荡：电场的能量(a)周期性地转变为磁场的能量(c)，或者相反地转变(e)。

流将继续流动，其强度尽管在减小，但却使两个球又充上了相反符号的电荷(图 V-17 d)。磁场能量又变回为电场的能量，最后，电流变为零，这时两个球所充的电荷数量与原来相同，但符号相反(图 V-17 e)。这个过程又要重新开始，但是现在方向相反了，电的这种振荡将来回不断进行，直到由于载流导体变热致使能量逐渐损耗而使其趋于停止为止。这种情况很象单摆，单摆在每次摆动中摆到两个端点时动能就转变成了势能。

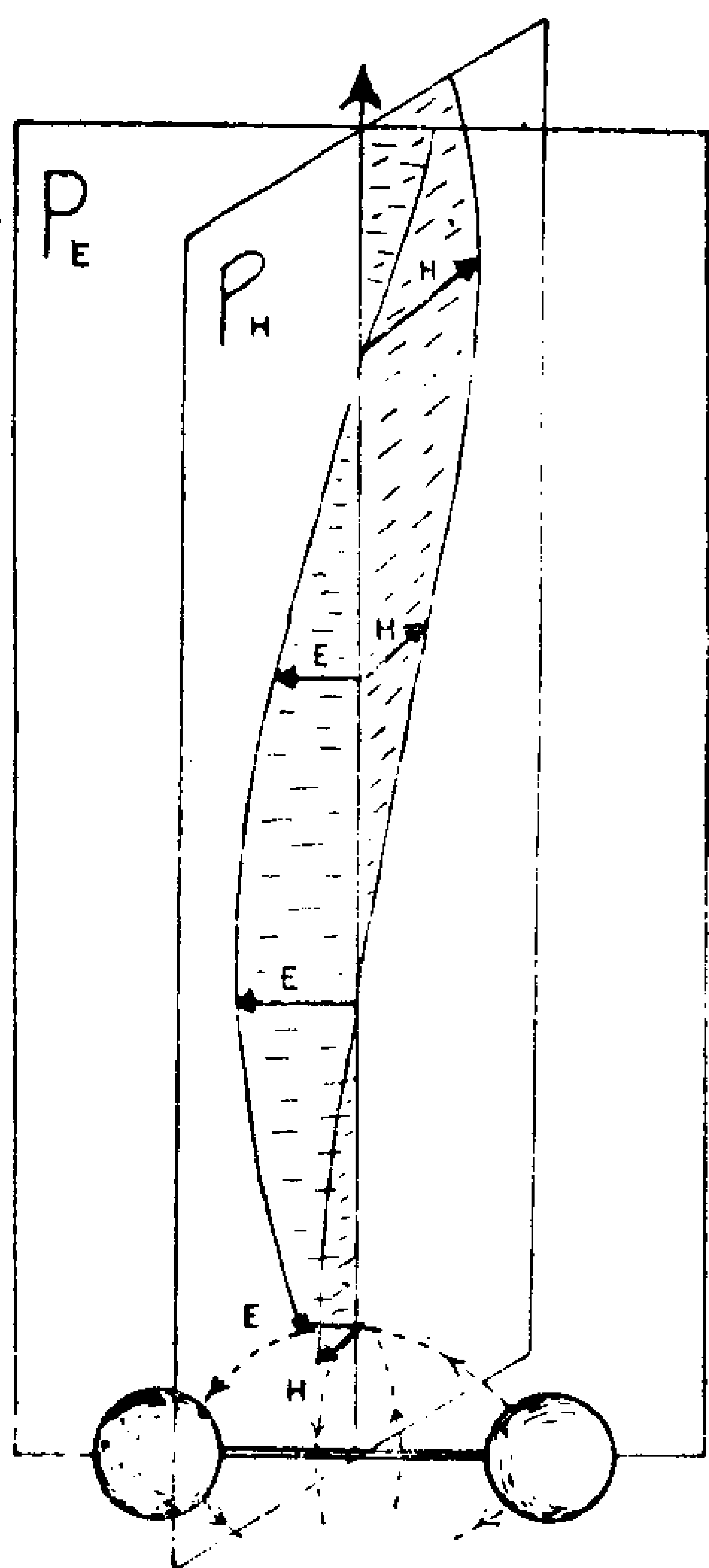


图 V-18 两个导体之间的电荷振荡结果产生了电磁波的传播。

麦克斯韦用自己的方程式证明了，上述式样的振荡电磁场是以波的形式在振子周围的空间传播的，它们在传播时带走了能量。因为电力线是处在通过导线的平面内，而磁力线垂直于它，所以电磁波在传播中电矢量与磁矢量则互相垂直，并且也垂直于传播方向(图 V-18)。1888 年，在麦克斯韦的论文预言存在这种电磁波之后不久，德国物理学家赫兹就从实验上证实了它们的存在，从而导致无线电通信技术的发展，成为现代工业文明的重要组成部分之一。

现在我们想比较详细地讨论一下麦克斯韦理论中的一个要点，即如何计算电磁波的传播速度问题。在考虑电场与磁场之间

的相互作用时，我们要遇到用什么单位来度量各种电磁量的问题。前面说过，电荷单位的定义是这样一个电荷：它对一个相距一厘米远的同样电荷的排斥力是一达因。因此，电场单位的定义就必须是这样一个电场：它对于放在其中的单位电荷的作用力是一达因。对单位磁极和单位磁场也可以给出类似的定义。但在考虑既涉及电又涉及磁的现象时，例如考虑电流产生磁场的现象时，会发生什么情况呢？

假定我们要研究电流对一个放在离导线一厘米远的磁极的作用。我们可以把电流的单位定义为每秒内流过以上述定义为单位的单位电荷的电量。但是如果这样定义的话，该电流所产生的磁场对一个放在一厘米远的单位磁极就不一定是一达因了，实际上要等于一达因也是绝对不可能的。反之，我们可以把单位电流定义为这样大的电流：它产生的磁场对一个放在一厘米远的单位磁极的作用力是一达因。但是如果这样定义的话，载有单位电流的导线中所流过的电量就不会等于上述定义的静电单位电荷了。结果，物理学家不是仅选用其中一种可能的定义而放弃另一种，而是认为同时利用两者较好，所以他们引入了一个常数因子来把其中一种单位制转换为另一种，这种情况颇象是在度量热量时，既可以用卡也可以用尔格（两者之比是 4.2×10^{7}）。利用电吸力和电斥力的库仑定律来定义的电荷电位（上述两种定义中的第一种）称为**静电单位**（esu），而利用电流对磁极作用的奥斯特定律来定义的电荷单位，则称为**电磁单位**（emu）。一个电磁单位等于 3×10^{10} 静电单位，所以每秒流过一个静电单位电荷的电流，对一厘米远的单位磁极的作用力只有 $\frac{1}{3\times10^{10}}$ 达因，而两个各带有一个电磁单位电荷的物体相距一厘米远时，彼此之间的排斥力则是 $(3\times10^{10})^{2}$

达因。

因为麦克斯韦在写他的方程式时是用静电单位表示电场而用电磁单位表示磁场，所以在一边含电场另一边含磁场的方程中就自然出现 3×10^{10} 这个因子。而且，在应用这些方程来描述电磁波的传播时导致如下的结论：传播速度的数值等于这两种单位之比，即每秒 3×10^{10} 厘米。啊呀！你看，这个数字正好和麦克斯韦出世之前很久就已用各种方法测出的真空中的光速一致！啊哈！麦克斯韦大概曾想到，这一定意味着光波实际上是一种波长很短的电磁波，这个想法导致了物理学中一个重要分支即光的电磁理论的发展。我们现在可以具体想象光和物质之间的相互作用了，包括光的发射、传播和吸收现象，它们乃是短波长的电磁波与物质中细小的带电粒子相互作用的结果，这些粒子就是带正电的原子核周围的快速运动的电子。而且，应用麦克斯韦方程，我们可以极其详尽地解释所有的光学现象和定律。

象静电单位与电磁单位之比与光速这类似乎毫无联系的物理量之间的数值上的一致，在物理学中往往导致一些根本性的新发现和高度的概括。我们在本书后面还会看到另外两个物理常数之间的这种一致，一个是与灼热物体发射光波和热波有关，另一个则与金属表面在紫外线照射下发射电子有关，结果证明，它们的一致在量子理论的发展中起了极其重要的作用。

第六章　相对论的革命

正如上一章所述，19 世纪末的物理学界根深蒂固地确立了一种思想，认为有一种到处存在的、能穿透一切的介质，它充满所有物质的内部和它们之间的空间。惠更斯把这种介质称为宇宙以太，它的作用是作为传播光波的基础；后来它又叫做法拉第管，被认为是引起带电体和磁化物体之间相互作用的原因。麦克斯韦的工作使这两种假想的介质统一起来了，他指出光是传播的电磁波，并建立了一个优美的数学理论，把所有涉及光、电和磁的现象结合在一起。但是，物理学家们有了这一切的成就，他们却发现要用描写气体、固体和液体这类常见介质的办法来描述这种神秘的宇宙介质的特性，那是不可能的，这方面的所有的企图都导致难以解决的矛盾。

经典物理的危机

确实，光的偏振现象无可置疑地证明了光所涉及的是一种横向振动，即是垂直于传播方向的一种往返的物质运动。但是，横向振动只能在固体中存在，因固体与液体和气体不同，它要反抗任何想改变其形状的企图，所以必须把光以太看作是一种固体物质。但要是这样，如果宇宙以太充满了我们周围整个空间的话，我们又怎么能在地上跑来走去，行星又怎样能千百万年地绕着太阳转动而丝毫没有遇到阻力呢？

著名的英国物理学家开尔文爵士曾认为宇宙以太有着类似于

鞋匠所用的鞋胶或鞋蜡之类所具有的那些性质，试图以此来解决这个明显的矛盾。这类物质所具有的性质称为可塑性，在很快加上强力作用下，它们能象一块玻璃那样断开，但在很弱的力(例如它们本身的重力)的作用下，它们会象液体那样流动。他认为在光波的情况下，力的方向每秒要改变千百万次，这时宇宙以太的行为就象硬的弹性物质那样，而在人、鸟、行星或恒星的缓慢得多的运动情况下，它实际上不会产生什么阻力。但是，如果法拉第管是宇宙以太的张力和压力的话，永久磁石和静电荷即使存在很短的时间也是不可能的了，因为在这种神秘的物质中，压缩会由于塑性变化而很快松弛下来。一个人知道正确的答案后再去批评别人的错误结论是很容易的，但实在令人诧异的是，上个世纪伟大的物理学家竟没有人认识到，假如以太存在的话，它的性质应当完全不同于我们熟悉的普通实物所具有的那些性质。事实上大家都知道，气体的可压缩性、液体的流动性、固体的弹性以及普通实物所具有的那些性质都是由它们的分子结构决定的，是分子运动和分子之间相互作用的结果。俄国化学家门捷列夫在他的元素周期表中曾把宇宙以太列为周期表中原子序数等于零的物质，也许除他之外，似乎谁也没有想到宇宙以太具有其自身的分子结构，并且想到这样的假说总是会把事情进一步复杂化。如果磁石和带电体之间的作用力以及光在空间中的传播必须用某种基质的存在来解释的话，这种基质和我们所熟悉的普通实物就不能有任何共同之处。但是，人的思想总是经常为传统的习惯观念所束缚，正是由于爱因斯坦的天才，才把陈旧的和自相矛盾的宇宙以太完全抛弃，并代之以推广的电磁场概念，爱因斯坦认为电磁场也是一种物理实在，与任何普通实物是一种物理实在一样。

光的速度

伽利略是第一个试图测量光速的人。有一天晚上，他和他的助手带着两盏带挡板的提灯到郊外去。他们尽可能离得远些分开站着，但彼此仍保持能看得见的距离，他们作了这样一个实验：助手一看见伽利略提灯的闪光就马上闪一闪自己的提灯。返回信号到达的延迟时间，将表明光是以有限的速度传播的，并且应能测出这一速度。但是，这个实验完全失败了，因为我们知道，光的传播速度极大，预期的延迟时间不会大于十万分之一秒。两个多世纪以后，法国物理学家斐索以大大改进了的形式重复了伽利略的实验，他使用的装置如图 VI-1a 所示。这是一对装在一根长轴两端的齿

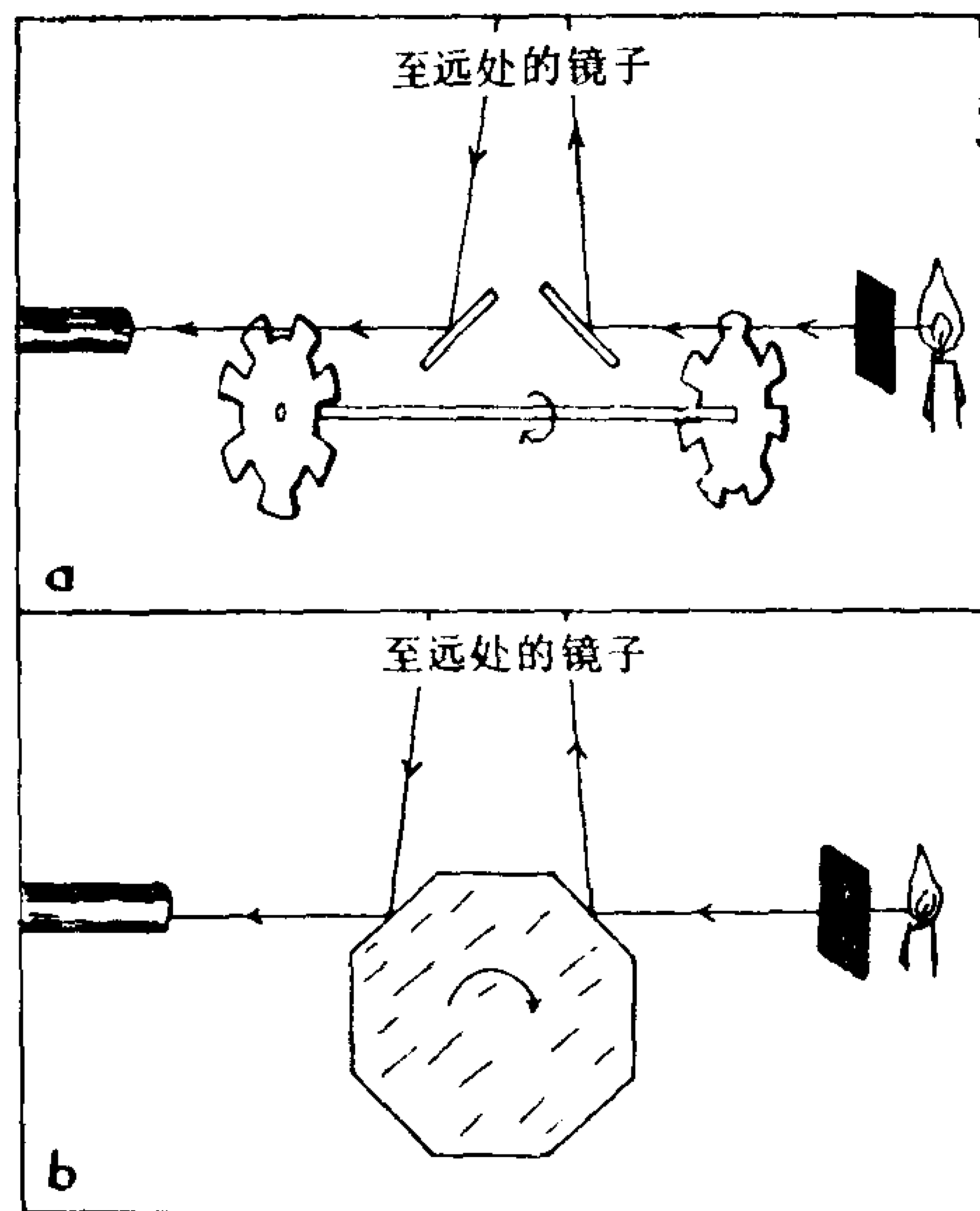


图 VI-1 斐索(a)和傅科(b)测量光速的方法

轮。齿轮的位置恰好使得其中一个齿轮的齿对准了另一个齿轮两齿之间的缺口，所以无论长轴怎样转动，左边的眼睛都不能看到从右边光源发出的光束。但是，如果让轮子开始快速转动，而且转动的角速度使得它们在光从一个轮子传播到另一个轮子所花的时间

内正好转过了两相邻齿之间距离的一半时，就可以指望光能穿过它们而不致受阻。实验利用三个平面镜有意加长了两齿轮之间的光程，其中一面镜子放得很远，如图所示。斐索使轮子以每分钟几千转的速度旋转，结果满意地看到光稳当地穿过了整个系统，他归纳了实验数据，算出光速恰好是 3×10^{10} 厘米/秒。这个数字与丹麦天文学家罗默在伽利略死后仅约三十年所得到的数字完全相符，罗默是观测到木星在离地球不同的距离时，它的月食有着明显的延迟而测到这个数字的。

斐索的实验只能用来测量光在空气中的速度（它实际上与真空中的速度一样），因为用来加长光程的镜子必须放得很远才能观测到结果。他的朋友和合作者傅科（两人都是生于 1819 年，并且是法国科学界的双星）用旋转镜法来代替齿轮法成功地缩短了这一距离。他的装置如图 VI-1b 所示，一看就明白，这个装置能使光程缩短到只有几米，所以他可以让光在水或其它任何透明的物质中通过全程。他做了这个实验后发现，光在物质中的速度比在真空中小些，这就给惠更斯的观点（与牛顿的观点相反）提供了一个虽然为时已晚但仍十分有力的支持。光的波动说曾预言，光在水、玻璃等物质中的速度恰好等于真空中的光速除以该物质的折射率。

光在运动介质中的速度

牢固地掌握了精确测量光速的方法之后，十九世纪的物理学家就忙于做各种有关光的传播的实验，希望弄清楚宇宙以太的性质，这种神密的介质一直被认为是传播光波的媒介。斐索在 1851 年完成了一个很重要的实验，但是直到爱因斯坦首次发表他的论文之前，人们都未能了解这个实验的全部意义。实验的目的是想

看看介质的运动对在其中传播的光的速度影响如何。在声波通过空气传播的情况下，其传播速度当然要直接受到空气物质运动的影响，声音在顺风或逆风传播时速度要增大或减小，其变化量等于风速。这一点在光通过运动介质传播时没有疑问吗？情况也会如此吗？为了解决这个问题，斐索决定去测量光在一个通有高速水流的管子中传播的速度。这时水流的速度要加到真空中光速上或从它减去吗？在这个实验中，预期的光速变化当然是很小的，因为技术上能够达到的水流的最高速度与光速相比仍是非常非常小的。因此，要直接测量光在这种情况下的速度不论是用上述斐索的方法还是用傅科的方法，都不会显示出任何差别。但是，因为我们只要求知道光在运动着的水和静止水中的速度之差，所以这里我们可以根据两条光线的干涉原理使用一种更准确得多的方法。这个实验的原理如图 VI-2 所示。

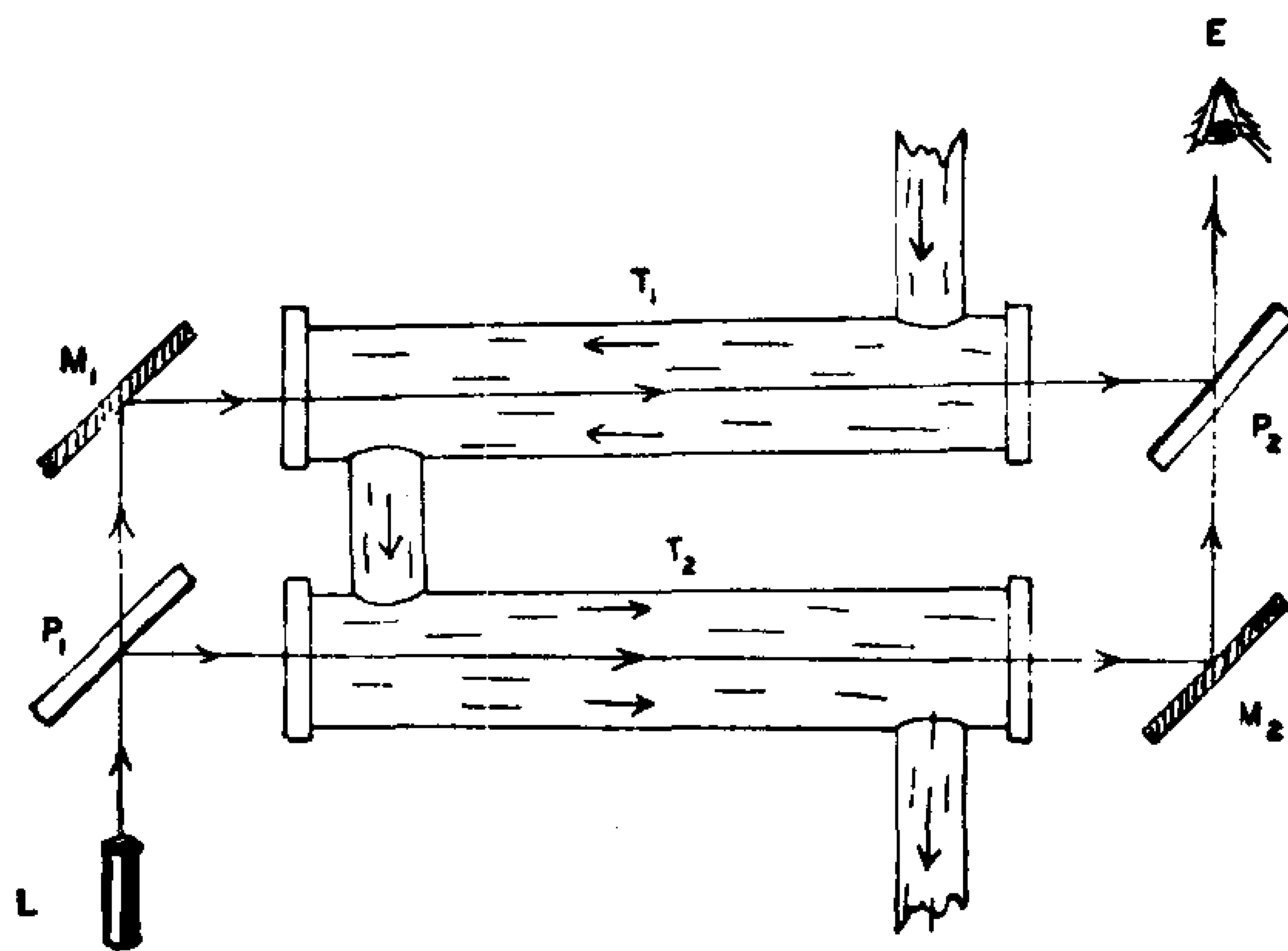


图 VI-2　斐索做的观察光在运动介质中传播时速度变化的实验。

从水银灯 L 发出的单色光落到一片玻璃 P_1 上，P_1 上涂有一层很薄的银，银的厚度刚好足以使一半的光发生反射，而另一半的

光则穿过它，并被镜面 M_1 所反射。这样，我们就得到了两束强度相等的平行光，其振动是同步的，就象第三章所描述的扬氏实验中的情况一样。让这两束光通过两根管子 T_1 和 T_2，然后借助玻璃片 P_2 和镜子 M_2 再使他们会合到一起。如果两个管子中的水是静止的，这两束光进入观察者的眼睛 E 中相位便相同(即波峰对波峰，波谷对波谷)，因而是原来的光强度相加。但是，如果管中的水沿着相反的方向运动，"拖住了"光波，那么下面一束光波到达 E 的时间就比上面一束早些，而且，如果差值正好是波长的一半，就会发生相消干涉(波峰对波谷，波谷对波峰)。让我们粗略计算一下，水流要多快才能产生这样的相位差。斐索实验中的管长是 1.5 米即 150 厘米，他所用的波长约 0.5μ (5×10^{-5} 厘米)，所以整个管子中的波列共有 3×10^6 个波。要使这个数字改变半个波长（从 3×10^6 个变到 3×10^6 又 $\frac{1}{2}$ 个)，流水管中的光速必须增大或减小原来数值的 $\frac{0.5}{3\times10^6}$，即 1.7×10^{-6}。因为光在水中的速度约为 2×10^{10} 厘米/秒，所以为了得到上述结果，所需的水流速度大约应为 $2\times10^{10}\times1.7\times10^{-7}=3000$ 厘米/秒 $=30$ 米/秒，水在管中的这个流速是相当高的，但还是可以达到的。因此我们有可能在这个实验中观测到干涉条纹，从而发觉预期的光速变化。

斐索用各种不同的水流速度做了精确的测量，得到的结果介于两个预期的可能性之间。他发现光在流水中的速度是不同于静水中的速度的，但是两者之差比水流的速度小。他观测了干涉条纹的移动，从而发现光在水流方向传播的速度增大了水速的 44%，而在相反方向的传播速度则减少了同一数量。若用其它液体做实验，则发现它们对光在其中传播速度的影响有着不同的数值，并且得出一个结论：光在运动液体中的速度一般地可以用如下

的经验公式*来表示

$$V=\frac{c}{n}\pm\left(1-\frac{1}{n^2}\right)v$$

式中 n 是有关液体的折射率，v 是流速。当时不论是斐索还是别的人，都不能指出这个结果可能意味着什么，这种情况一直维持了半个世纪之久，后来才由爱因斯坦指出，这个神秘的经验公式乃是相对论的直接结果。

光在运动地球上的速度

1887年，爱因斯坦八岁的时候，美国物理学家迈克尔逊与其合作者莫雷做了另一个杰出的实验。如果斐索能观测到快速运动的水流对其中传播的光的影响，我们也就应当能观测到地球在空间的运动对于在地球表面测量光速时产生的影响。实际上，地球在其轨道上绕着太阳转动的速度大约是每秒30公里，因此应当有以太风刮过地球表面，也许还可以穿过地球球体，就象开汽车的人在一个无风的日子里开一辆敞篷车的情况那样。迈克尔逊和莫雷的实验所遵循的原则与斐索实验是相同的，但是经过了改进，因为在这情况下我们显然不可能有两个相当于一对平行管子的东西，使以太风在其中沿相反的方向吹过。作为代替，他们决定测量光在下列两种情况下往返一次所花的时间：一种情况是沿着预期的以太风方向传播，另一种情况是垂直于以太风传播。为了弄懂这个实验的原理，让我们考虑一只汽船在河中周游的两种情况：一种情况是沿着大河行驶，另一种情况横渡大河。在前一情况下，航程的前半段汽船是顺水漂流，速度是 $V+v$，这里 V 是汽船相对于

* 经验公式不是一种根据某一特定理论用数学方法推导出来的公式，而只是一种经过调整以符合实验数据的公式。

水的速度，v 是河水速度。返航时船是逆水而行，运动速度是 $V-v$。如果 L 是河岸上两站之间的距离，则往返一次所花的时间将是

$$t=\frac{L}{V+v}+\frac{L}{V-v}=\frac{2LV}{V^2-v^2}=\frac{2L/V}{1-\frac{v^2}{V^2}}$$

因为 $2L/V$ 是船在静水中往返一次的时间，所以我们看到，水的流动总是要使这一时间变长。特别是如果 v 等于或大于 V，船将永远不能回来 t 就变成无限大了。

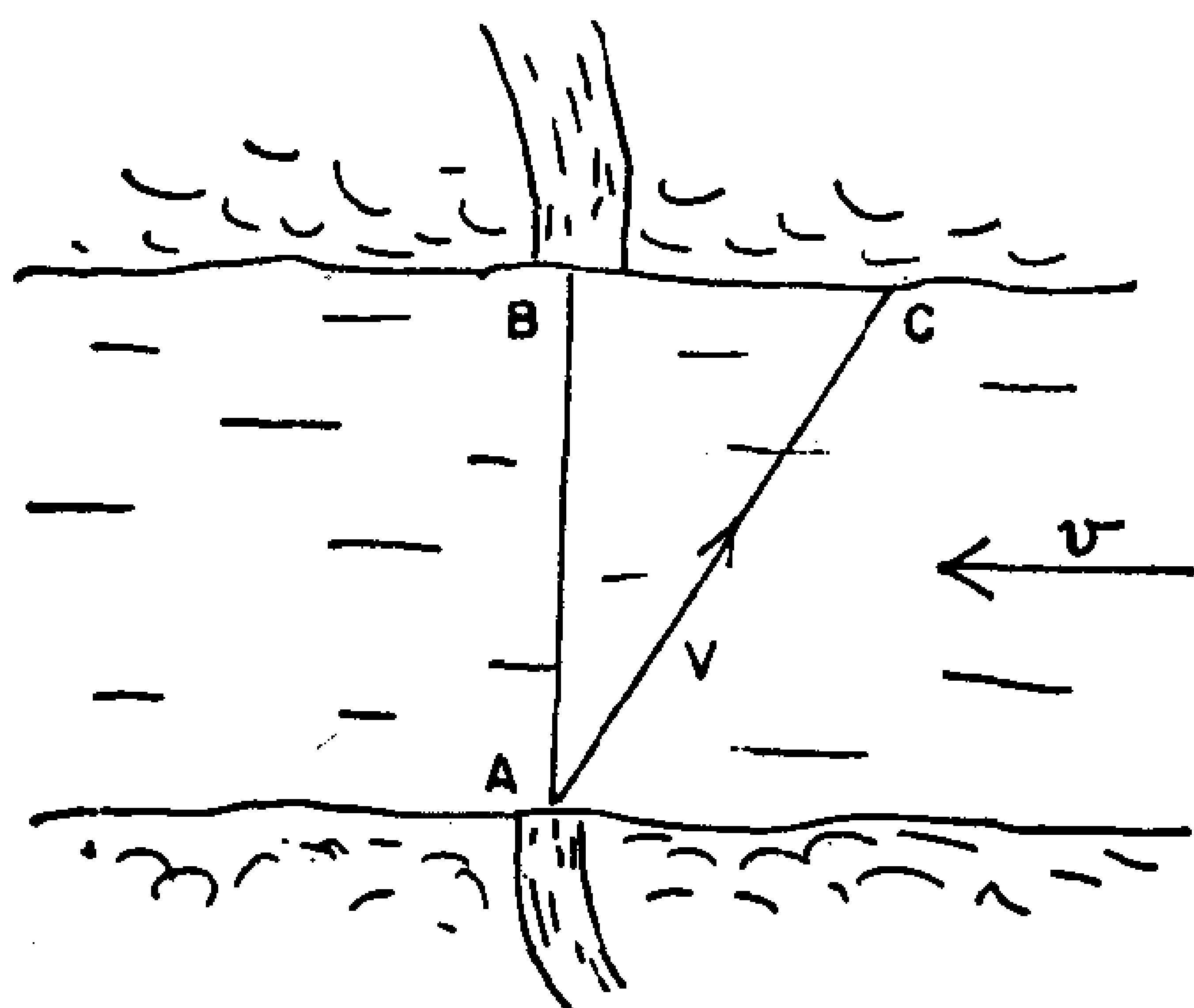


图 VI-3 汽船过河的问题

现在让我们来考虑船横渡大河的情况(图 VI-3)。如果它是 A 点出发，必须在正对河的 B 点靠岸，它就必须使它的航向稍微向上游偏一些，以补偿漂流的航程。因此，当它相对于水通过的距离是 AC 时，它向下游漂移的距离则是 CB。显然，比值 CB/AC 等于水流速度与船速之比。对直角三角形 ABC 应用毕达哥拉斯定理，就可得到：

$$\overline{AB}^2+\left(\overline{AC}\times\frac{v}{V}\right)^2=\overline{AC}^2$$

或

$$\overline{AB}^2=\overline{AC}^2\times\left(1-\frac{v^2}{V^2}\right)$$

或

$$AC=\frac{\overline{AB}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}}$$

若 $AB=L$，则横过大河并返回来所花的时间便是

$$t_{\uparrow\downarrow}=\frac{2\overline{AC}}{V}=\frac{2L/V}{\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}}$$

与前一情况一样，这时间也比静水时长了，但是校正因子 $\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}$ 比前面得到的因子 $\left(1-\frac{v^2}{V^2}\right)$ 要小一些。

现在我们把流动的河水改为以太风，把汽船改为光波，你就得到迈克尔逊-莫雷实验了。实验所用的装置大致如图 VI-4 所示。它安装在一块坚固的大理石板上，石板漂浮在水银中，所以它能轻易地绕着中心轴转动而不致摇晃。从灯 L 发出的光束落到位于石板中心的一块玻璃片上。玻璃片上涂有一层薄银，使入射光束的一半发生反射，而让另一半通过。这两束光再被两面距离中心同样远的镜子 M_1 和 M_2 反射。在 M_1 上反射的光回到涂银片时，有一部分穿过玻璃

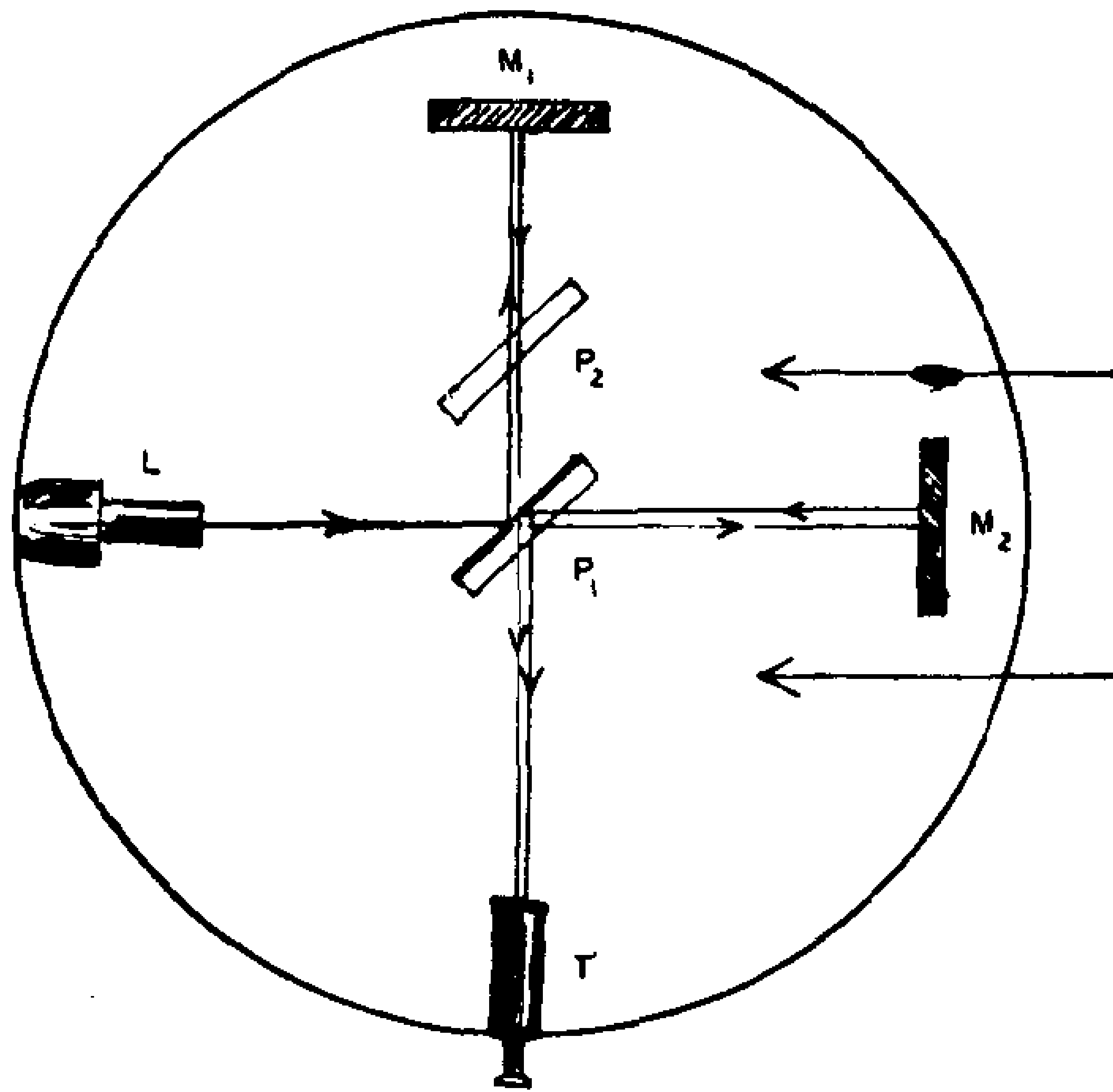


图 VI-4 迈克尔逊-莫雷实验装置，表示光线的路程。为画图方便起见，落到镜面 M_1 和 M_2 并从它们反射回来的光线画得分开了些。玻璃片 P_2 的引入是为了补偿光线向镜面 M_2 方向运动时在 P_1 中多走的附加光程。

（另一部分的情况就不管它了），而从 M_2 回来的光则有一部分被

反射(它的另一部分如何也不必管了)，这两条光线一起进入望远镜 T。如果没有以太风，这两束光的相位就会相同，而在望远镜的视域中产生最大的亮度。如果有以太风吹过，比如从右边吹向左边，则横穿以太风的光所延迟的时间就会比顺着和逆着以太风的延迟小些，因而至少会发生部分的相消干涉。下面是对这种情况的一个粗略的数值估计。光在两个相互垂直的方向传播时所花的两个时间 t_1 和 t_2 之比，根据上面讲到的公式应为

$$\frac{1-\frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

公式中的 V 改用了光速 c。比值 $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ 在这种情况下等于 $\left(\frac{3\times10^6}{3\times10^{10}}\right)^2=10^{-8}$,即 0.00000001。可以证明*，对于这样小的 $\frac{v^2}{c^2}$ 的数值，根号 $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ 可以很好地近似表为 $1=\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}=1-0.000000005=0.999999995$。因此，两列波到达时预期的时间之差只有十亿分之五。但用灵敏的光学仪器来观察这已经够大了。事实上,如果大理石板的直径是 3 米(实验用的板差不多就是这样大),则总的传播时间(从玻璃片到镜面再回来)是 $\frac{300}{3\times10^{10}}=10^{-8}$ 秒。这样,两列波到达望远镜的时间之差便是

$$5\times10^{-9}\times10^{-8}=5\times10^{-17}\text{秒}$$

当波长是 6×10^{-5} 厘米时，振动周期是 $\frac{6\times10^{-5}}{3\times10^{10}}=2\times10^{-15}$ 秒。因此到达时间之差是 $\frac{5\times10^{-17}}{2\times10^{-15}}=2.5\times10^{-2}$,即振动周期的 2.5%，所以应当产生可以觉察到的相消干涉。在实际的实验中不是靠强

* 实际上这就是牛顿爵士第一篇数学论文的内容。

度的减弱，而是靠一组干涉条纹移动它们之间距离的 2.5% 来观测这一效应的。若把整个装置转动 90°（这就是为什么要把它漂浮在水银上的原因），从而交换镜子 M_1 和 M_2 的作用，我们预料在相反方向会有相同的移动，因而条纹移动的总量应为它们之间距离的 5%，如果观测到的话，这一移动就会表明地球在空间运动的速度是每秒 30 公里。

好，实验是做了，但丝毫移动也没有观测到。这是怎么回事呢？是不是光以太百分之百地随着运动的地球漂移呢？后来，在漂浮于高空的氢气球上重复了迈克尔逊的实验，结果否定了这种可能性。物理学家们绞尽脑汁也弄不清楚这是怎一回事。英国物理学家斐兹杰惹（实际是爱尔兰人）提出了一个完全革命性的建议，认为所有在宇宙以太中以速度 v 运动的物体，都要在运动方向收缩，收缩的比率是 $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$。这一收缩被认为对一切物体都相同，与其物理结构无关，它在迈克尔逊-莫雷实验中，会使中央玻璃片与以太风上风的那面镜子之间的距离减小，减小的数量恰好能使两束光到达的时间相等，因而排除了干涉条纹的任何移动。人们曾经作过许多尝试，企图用组成物体的原子之间电力和磁力的相互作用来解释这种假设的“斐兹杰惹收缩”，但结果都是白费。有人给这个大胆而巧妙的假设做了这样一首歌谣：

> 青年费斯克，剑术真精灵，
> 挥刃快如风，神速实堪惊。
> 斐氏有收缩，未曾去留心，
> 长锋才出手，马上成饼形。

但这首歌谣只说对了一半，并非完全正确。

一个插曲

在我们开始了解爱因斯坦对迈克尔逊-莫雷实验的否定结果所作的解释之前，最好先讨论一个有趣的问题，它虽然与相对论没有多大关系，但是却有相对性的情味。一个人乘船在河中逆流而上(图 VI-5)，有半瓶威士忌酒放在船尾。当船经过桥下时，桥墩激起的波浪冲击着船，结果瓶子落入水中而未被发觉。现在船继续逆水航行了 20 分钟，同时瓶子则顺水漂浮而下。20 分钟后这个人发现瓶子不见了，于是掉转船头(这个动作需要的时间忽略不计)顺水而下，这时船相对于水的速度与以前相同，后来在桥下游一海里远的地方拣到了酒瓶。问题是：河水的速度多大？在往下读之前你试着解一下这个题目看，就会发现它显得有多困难了。事实上，有几位老练的数学家都曾被它难住过。

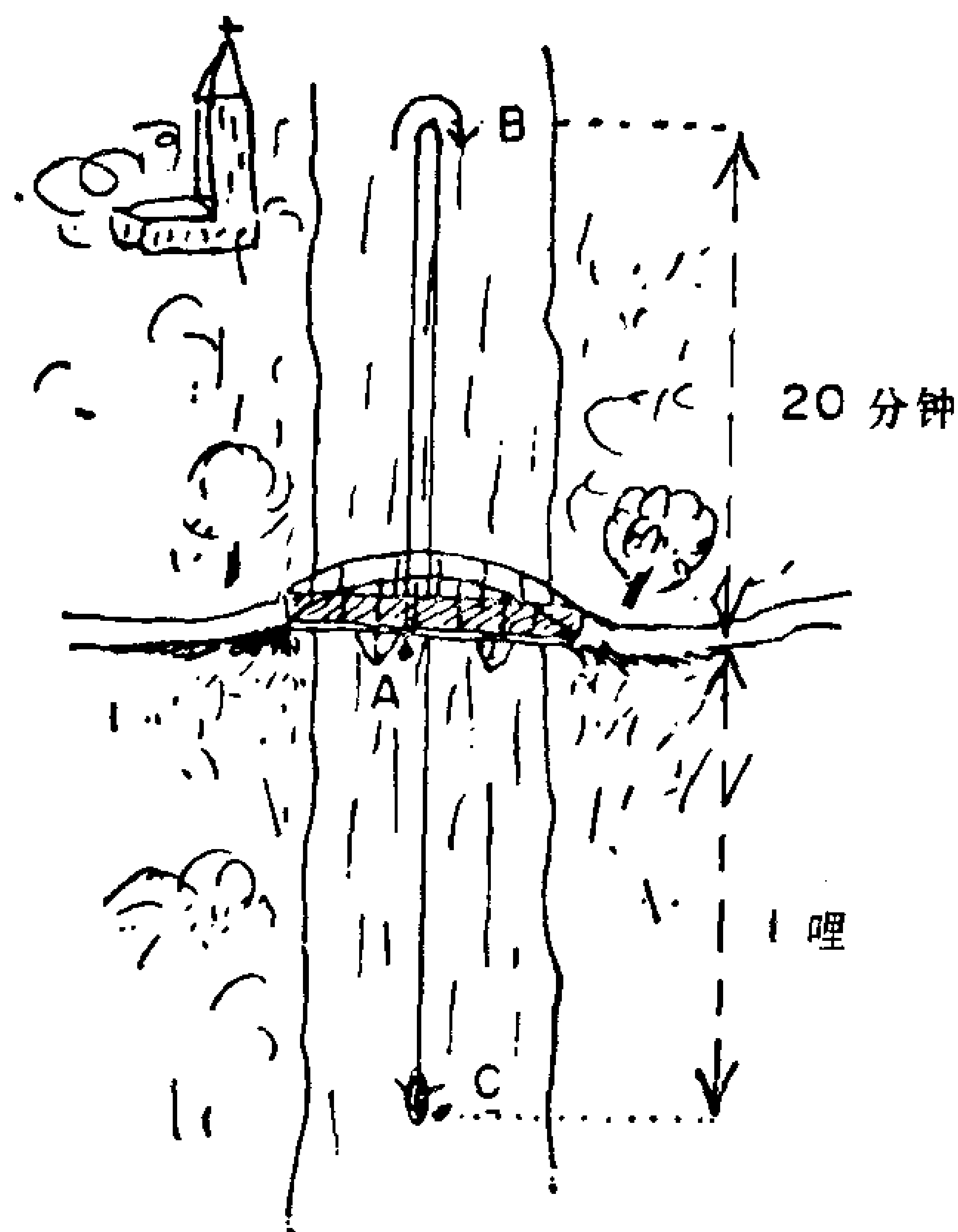


图 VI-5 找回失瓶的问题

但是，如果我们不是象平常那样相对于河岸来考虑问题，而是相对于河水来描述上述事件，事情就变得很简单了。假定我们坐在一只漂流而下的木筏上观察周围。对我们来说，水是静止的，而河岸和桥将以一定速度沿河运动。现在有一条船从我们旁边过

去，并有一只威士忌酒瓶掉在水中。船在继续航行，而瓶子则漂浮在它落下的地方不动。（记住：水相对于我们是**不动的**。）20 分钟后我们看到船转回头了，回来找酒瓶。当然，船要再花 20 分钟才能回来。因此酒瓶在水中呆了共 40 分钟，而在这一段时间里，河岸和桥运动了一海里。这样，桥相对于水的速度或者说水相对于河岸的速度是每 40 分钟一海里，即每小时 $1\frac{1}{2}$ 海里。很简单，是吗？

传记片断

这里应当提一下爱因斯坦（图 VI-6）的履历：他于 1879 年 3 月 14 日生于德国慕尼黑附近的一个著名的（因其民间诗人和音乐家协会而著名）小城镇乌尔姆，他的父亲在那里拥有一家电气工厂。爱因斯坦在慕尼黑渡过了童年，后来移居瑞士，在苏黎士工艺学校学习，并给天资差的学生补习数学和物理赖以维生。1901 年，他结了婚并得到了一个清闲但收入不太好的位置：在伯尔尼的瑞士专利局当专利检验员。1905 年他 26 岁的时候，在德国杂志《物理年鉴》上发表了震撼科学界的三篇论文。这三篇论文涉及物理学的三个广泛领域：热、电和光。其中一篇已在第四章中提到，内容是关于布朗运动的详尽理论，它对于热现象的力学解释的发展

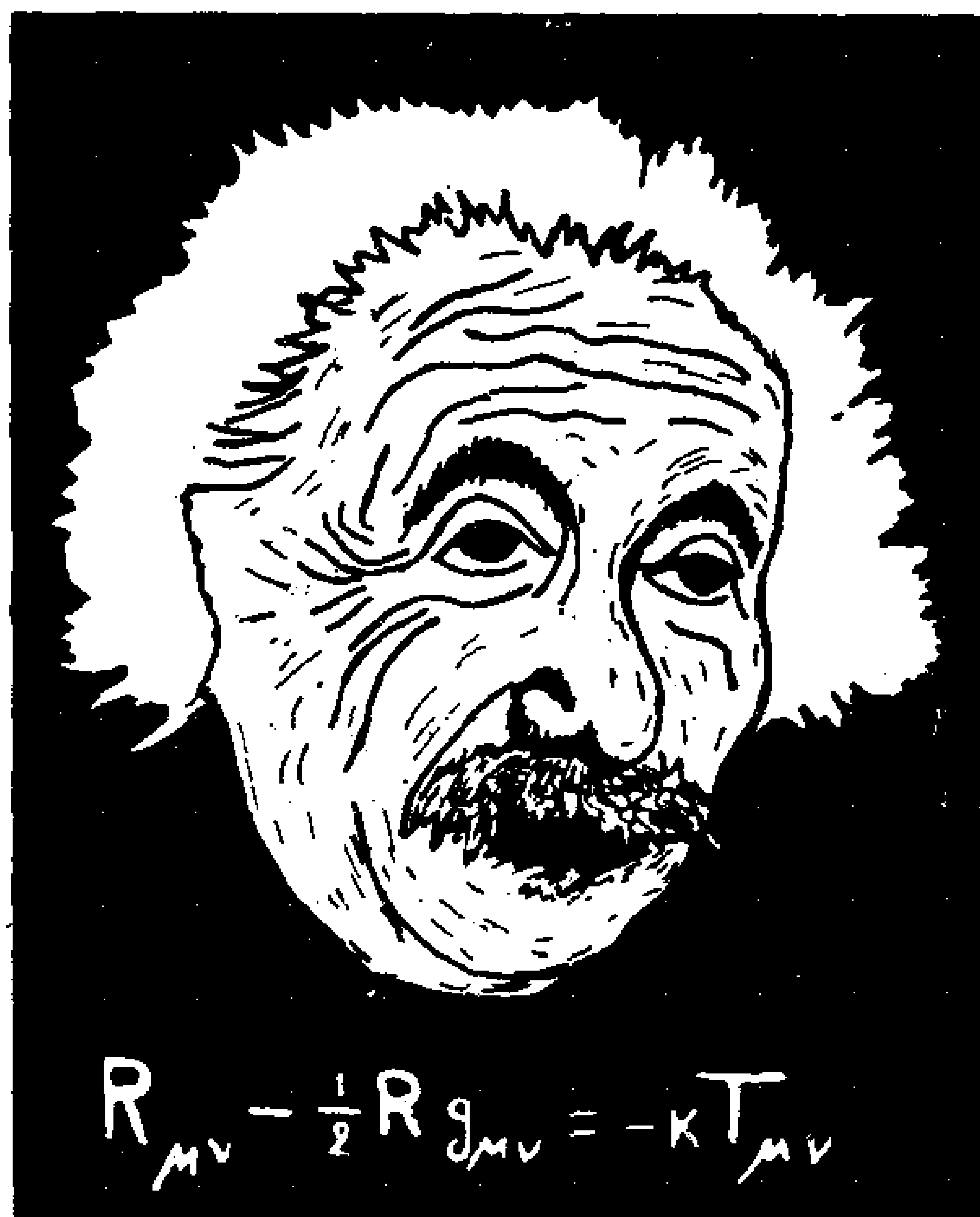


图 VI-6 阿尔伯特·爱因斯坦

有着极其重要的意义。另一篇论文是根据当时刚提出不久的量子假说解释了光电效应的规律，并引进了辐射能量分立化即光子的概念，这将在下一章中述及。三篇中对物理学发展最重要的一篇却给它起了一个颇为呆板的题目"论运动物体的电动力学"，它专论光速测量中的种种佯谬,这是关于相对论的第一篇论文。

运动的相对性

关于作为电磁相互作用和光波传播媒介的那种假想基质的性质,引起了成堆的困难和矛盾,它们纠缠在一起结成了一个无法解开的以太顽结,很象是传说中的那个山茱萸树皮结成的结,古希腊农民国王考第尔斯用它把自己的战车车轭绑在了柱子上。一位先知预言说:谁能解开这个考第尔斯结,他就会统治整个亚洲。亚历山大大帝达到了目的,他挥剑砍断了这个结。同样,爱因斯坦以他清晰的逻辑思想砍断了以太顽结，一举把宇宙以太拧碎扔出物理学厅堂的窗外,从而成为现代物理学的统治者。

但是,如果没有以太充满整个宇宙空间,也就不可能有什么绝对运动了,因为我们不可能相对于虚无运动。所以爱因斯坦说,我们只能谈论一个物体相对于另一个物体、或者一个参照系相对于另一参照系的相对运动,处于这两个参照系中的两个观察者,有同等的权利说:"我是静止的，对方在运动。"如果没有宇宙以太作为物体在空间中运动的公共参照系，我们就毫无办法探测到这一运动，事实上关于这一运动的任何陈述都必定是毫无物理意义的。所以，迈克尔逊-莫雷在他们的实验里测量不同方向的光速时，无法探测到他们的实验室和地球本身是否在空间中运动，也就不足为奇了。

让我们回忆一下伽利略的话(本书第 47 页):

把你和你的朋友关在一只大船的舱板下最大的房间里，里面招来一些蚊子、苍蝇以及诸如此类有翅膀的小动物。再拿一只盛满水的大桶，里面放一些鱼；再把一只瓶子挂起来，让它可以一滴一滴地把水滴出来，滴入下面放着的另一只窄颈瓶子中。于是，船在静止不动时，我们看到这些有翅膀的小动物如何以同样的速度飞向房间各处；看到鱼如何毫无差别地向各个方向游动；又看到滴水如何全部落到下面所放的瓶子中。而当你把什么东西扔向你的朋友时，只要他和你的距离保持一定，你向某个方向扔时不必比向另一个方向要用更大的力。如果你在跳远，你向各个方向会跳得同样远。尽管看到这一切细节，但是没有人怀疑，如果船上情况不变，当船以任意速度运动时这一切应当照样发生。只要这运动是均匀的，不在任何方向发生摇摆，你不能辨别得出上述这一切结果有丝毫变化，也不能靠其中任何一个结果来推断船是在运动还是静止不动。

对迈克尔逊-莫雷实验来说，我们可以把伽利略的话意译如下。把你和你的助手关在地球上一个大实验室里，取来一些光源、镜子和其它各种光学设备放在里面。此外，再拿来各种能测量电力、磁力、电流的仪器以及其它东西。然后靠逻辑论证你可以确信，如果地球是固定不动的，则光线的传播以及电荷、磁石和电流的相互作用都会与它们相对于你这个实验室墙壁的相对位置和方向无关。然后假定(真实情况正是如此)地球绕着太阳转动，而太阳又绕着银河系的中心转动。这时你将不可能看出上述这一切效应有丝毫的变化，也不可能依靠其中任何一个效应来推断地球究竟是在运动还是固定不动。

这就表明，在蓝色的地中海水面上航行的伽利略假想的船上凡是对蚊子、苍蝇、鱼、水滴和抛射体是正确的东西，对于在空间中运动的地球上的光波和其它电磁现象也是正确的。当然，伽利略并不难发觉他的船是相对于地球运动还是不动，这只要从舱内走出来到甲板上看看海水或海岸就行了。同样，我们观察恒星并测

定它们表观位置的变化(视差位移)和它们所发出的光波波长的变化(多普勒效应),也能确定地球是绕着太阳转动,而太阳相对于其它恒星运动。但是,如果不向外看,和力学现象一样,只靠观测电磁现象也是不可能探测到物体在空间中的运动的。

空间和时间的统一性

爱因斯坦领悟到,伽利略的运动相对性原理的这种推广形式要求我们对空间和时间的基本观念来一个彻底变化。自古以来,空间和时间都被看成是两个完全无关的独立实体,伟大的牛顿在其《原理》中写道:

> 绝对空间就其本性来说与外界任何事物毫无关系,它永远是同一的、不动的。
>
> 绝对的、真实的数学时间本身按其本性来说是均匀流逝的,与外界任何事物无关。

牛顿关于空间的定义暗示着对于空间中的运动存在一个绝对参照系,而他的时间定义则意味着存在一个绝对的计时系统,诸如由许多同步的精密时计或绝对时钟所构成的系统,它们处在宇宙空间的不同地方都能指示出标准的通用时间。但是实验证明了光速的不变性,这就打破了绝对空间的观念,同时也破坏了绝对的计时系统。为了理解绝对时间的这一崩溃,让我们来问一下,有什么最好的办法来校准两个相隔一定距离的时钟。当然,绝对时间公司的一位雇员可以带上一只标准的精密时计从一地走到另一地去校准两地的时钟;古时候在船上带着精密时计的航海家就是这样做的。但是,谁能保证精密时计在旅途中不会出错呢?现代的计时系统当然是依靠无线电信号,它们以光速携带着时间信息。对于在地球上计时的任何实际目的来说,由于光速的有限性所引起

的微小延迟完全可以忽略不计，但在星球之间校对时间时，它肯定就是重要的了，因为这时延迟也许长达许多小时。然而，这个困难完全可以克服，只要让信号往返一次，使它在信号接收地反射（毫无时间延迟地）回来就可以了。例如，如果信号是在时刻 t_1 送出的，并在 t_2 时刻返回，则信号接收地在信号到达时正确的时钟指示应是 $\frac{t_1+t_2}{2}$。因为根据迈克尔逊-莫雷实验，真空中的光速无论运动状况如何总是不变的，所以必须认为上述方法是绝对精确的，无可置疑的。另一种可行的办法是向相反的方向送出两个光信号；发送地点正好位于两站的中点，如果信号到达时两个时钟指示的时间一样，就可以认为它们被校准了。

下一步是要对两个相互作匀速运动的系统校对时钟，例如这两个系统是两列向相反方向对开的火车。我们选择列车为例，是因为铁路雇员经常夸耀他们那些往往是镀金的大金表，认为它们指示的时间总是很准的。要实行上述对表的方法，制动工人必须在列车的中点晃动他的信号灯，而司机和乘务长必须各自从火车头和公事间探出身来，在他们看到灯光到达时校准他们表上的时间。

这个程序使我们想起了过去伽利略利用灯的闪光来测量光速的尝试，但我们这里的意思当然不是真地要让两路列车上的工友来做这个实验。确切地说，它是爱因斯坦常说的“思想实验”（Eine Gedankenexperimet），在这种实验中，我们只是对情况加以设想，并设法根据已知实验（例如迈克尔逊-莫雷实验）的结果来推断可能发生的事情。

对两列火车 A 和 B 应用这种方法，我们就能校准每列车上的时钟，现在我们面临的问题是要比较一列火车上的时间与另一列火车上所计的时间。我们可以在两列火车处于如下的位置时来做这件事：火车头 A 正好经过公事间 B，公事间 A 正好经过火车头 B

(图 VI-7)。的确，在这个时刻 A 中的司机和 B 中的乘务长可以探身窗外并把他们的表并排放在一起来直接比较。A 中的乘务长和 B 中的司机也可以这样办。

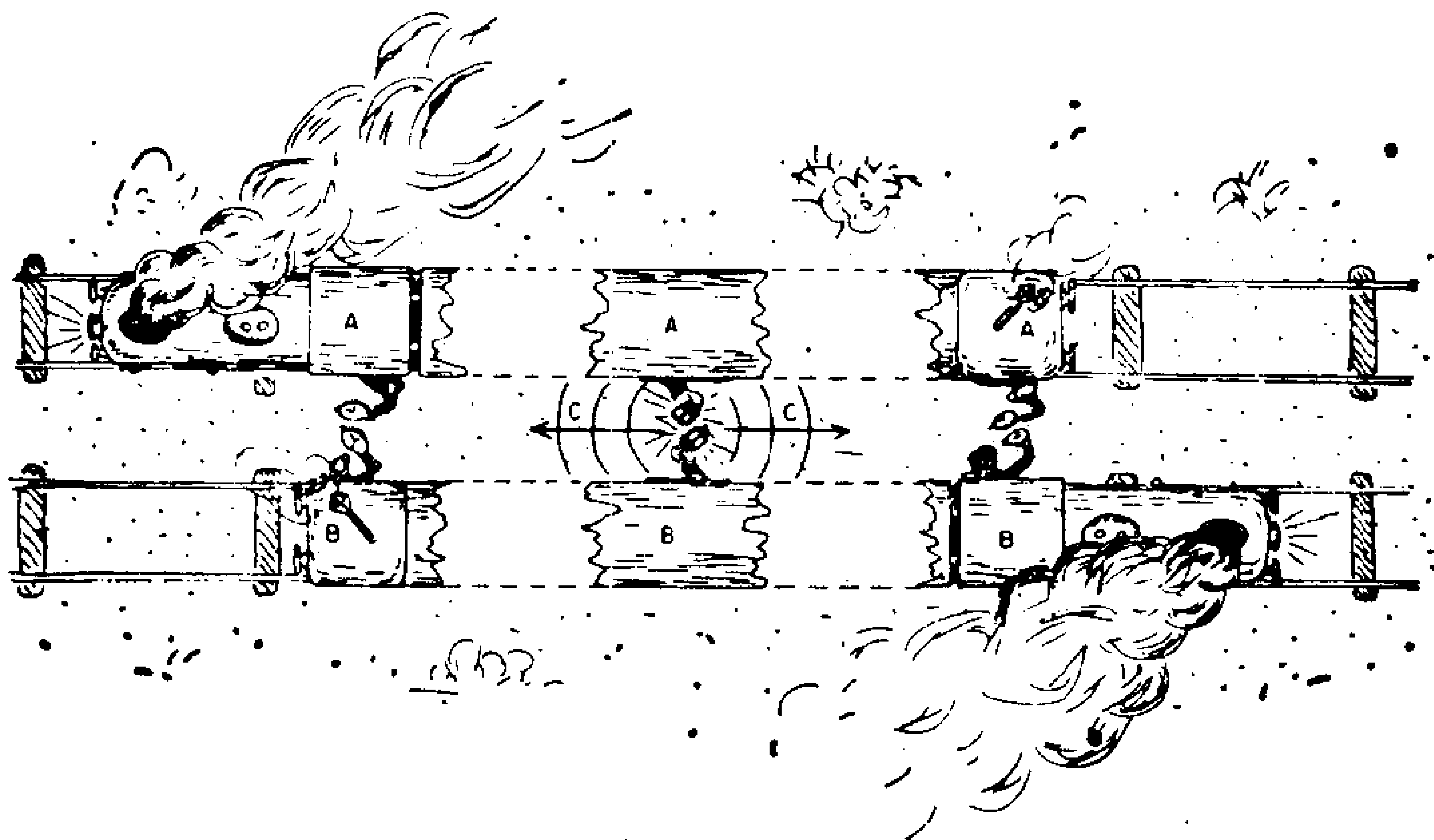


图 VI-7 在两列彼此作相对运动的列车上对表

我们可以把这种直接对表的结果与前述利用光波对表的结果联系起来：假定在 A 和 B 上有两位制动工人，当他们彼此对面地通过时就晃一下自己的信号灯。这时当然只有一个光波发出，因为两盏信号灯实际上完全重合。

现在让我们来考虑这一程序的结果。因为光是以有限的速度传播，所以它在到达列车两头之前需要经过一定的时间，当它最后到达时，车头 A 将在公事间 B 的左边，而公事间 A 则在车头 B 的左边。这样，光波在通过公事间 B 之后，需要经过一定时间才能到达车头 A。因此，如果同意采用光信号校表法，司机 A 和乘务长 B 的表在他们看到灯光时被拨到了相同的时刻，那么，当初在相遇时司机 A 的表一定是比乘务长 B 的表落后了。通过同样的论证，乘务长 A 的表应当比司机 B 的表在他们相遇时超前了。B 车上的人深

信他们的表是校准了的，因为他们采用的是光信号法，所以他将坚持认为A车上的表是错了，并认为车头A上的表比同一列车上公事间的表走慢了。同样，列车A上的人则认为他们自己校的表是对的，并且怀疑B上校的表有误。A车的司机会说，B车乘务长的表比正确的时间超前，而A车的乘务长则坚持B车司机的表落后。两人都会同意B车上的表一定是校错了，B车车头上的表一定比公事间里的表走得慢。这个争论永远无法解决，因为A和B两列车任何一方都不处于优先地位，因此我们必须得出结论说，在一个系统中校准了的两个时钟，当我们从另一个相对于它作相对运动的系统观察时，显得是没有被校准的，反之亦然。换句话说，在一个系统中相隔一定距离（火车的长度）同时发生的两个事件，当我们从另一个相对于它作相对运动的系统观察时会看到它们是不同时发生的。因此，空间与时间至少部分地可以相互转变，一个系统中单单在空间上分开的两个事件，当我们从另一个运动系统观察时，它们之间会有一定的时间差。

让我们举一个例子来阐明这个说法。试考虑一个人在一辆运动列车的餐车里吃饭的情形。他先喝汤，然后吃牛排，最后吃水果。这些事件对于列车来说都是发生在同一地点（同一张桌子上），但时间不同。然而从地面上一个观察者看来，这个人喝汤和吃水果则是间隔几英里的事了。这个极普通的事实可以表述如下：一个系统中在同一地点但在不同时刻发生的事件，从另一个相对于它作相对运动的系统去观察时是发生在不同地点的。现在让我们在上面这句话中用“时间”这个词来代替“地点”，并用“地点”来代替时间，就可以读成：一个系统中在同一时间（即同时）但在不同地点发生的事件，从另一个相对于它作相对运动的系统去观察时是发生在不同时间的。这正是我们上面已经得到的结果。

如果时间间隔等于零，当我们从另一个运动系统观察时它变得大于零了，那么，两个事件之间有限的时间差从这个运动系统看来就一定增大了。这就是从一个运动系统观测时著名的时间膨胀或时钟(连带着所有其它的物理、化学和生物过程)变慢。象一切相对论性的现象一样，时间膨胀对两个彼此作相对运动的系统来说是对称的，虽然列车 A 上的时钟被从它旁边开过去的列车 B 上的乘务员看成是变慢了，但列车 A 里的乘务员则坚持列车 B 里的钟慢了。可以证明，相对性时钟变慢的数值由下列公式确定:

$$t=\frac{t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

它和斐兹杰惹收缩的公式相似，不过根号是在分母上。

在快速运动的系统中一切物理过程都要变慢，这可以在“介子”衰变的情况下直接观察到，介子是不稳定的基本粒子，它们是以极高速度落到地球表面上的宇宙射线的基本组成部分，这将在本书的最后一章详加讨论。总的想法是在人造地球卫星中放一只原子钟，它是一种很精确的时钟，指针的运动是与里面气体分子的振动同步的。通过无线电信号将人造卫星上这个时钟的速度与一只静止在地面上的同样时钟加以比较，我们就能够证明时间膨胀的效应在大尺度范围内都是正确的。

相对论力学

从运动系统观察到的长度收缩和时间膨胀需要彻底改变一个座标系中空间和时间的测量与另一个相对于它运动的座标系中对这些量所做的测量之间的变换公式。让我们考虑两个座标系 (x, y) 和 (x', y')，它们彼此相对运动的速度是 v，并从它们的原点 O 和

O' 彼此重合的时候开始在两者中计算时间。让我们来考虑一个在带撇的座标系中固定不动的物体 P，其位置到原点 O' 的距离是 x'。在不带撇的座标系中，这个物体在时刻 t 的 x 座标是多少呢？即它到原点 O 的距离是多少呢？若用经典的牛顿观点，答案是很简单的。经过时间间隔 t 后，两个座标系原点分开了 vt 的距离，所以

$$x' = x + vt$$

我们还可以加上一个公式

$$t' = t$$

它是牛顿关于绝对时间定义的简单重复。

在爱因斯坦以前，这两个今天称之为"伽利略座标变换"的公式被认为是一个常识，第二个公式从来都不把它写出来。但是，空间距离部分地转换为时间间隔的可能性要求我们用两个比较复杂一些的公式来代替这些看上去很普通的式子。可以证明，为了满足光速不变性的要求以及其它上面讨论到的相对论性效应，旧的伽利略变换必须改为一组新的变换：

$$x' = \frac{x + vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{t + \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

这些公式称为洛伦兹变换，它们是由德国物理学家洛伦兹在迈克尔逊-莫雷实验的结果发表后不久导出的，但当时被洛伦兹和其它物理学家多少看成是一种纯娱乐性的数学游戏。正是爱因斯坦首先认识到，洛伦兹变换实际上反映了物理实在，它要求我们要对

旧的时间和运动的传统观念进行彻底的变革。

我们看到，虽然伽利略变换关于空间和时间座标不是对称的，但洛伦兹变换对它们却是对称的。在计算新的时间 t' 时，我们得给 t 加上一项与相对速度 v 有关的量，它类似于在计算新的空间座标 x' 时给旧的空间座标 x 所加的一项。在我们日常生活中遇到的所有情况下，涉及到的速度都比光速小得多($v \ll c$)，时间变换式分子中的第二项实际上等于零，两个公式中分母的因子实际上也等于1，这就回到了伽利略变换。但是，如果涉及到的速度可与光速相比拟，时间变换式中附加的一项就打破了绝对同时的概念，平方根因子则导致距离的缩短和时间的膨胀。

这里有必要讨论一下关于长度的相对缩短的误解。这种误解在物理学家中存在了五十四年之久，从爱因斯坦在1905年发表的原始论文起，直到1954年才由一位青年美国物理学家特雷尔发表了一篇批评性的短文加以矫正。过去，人们总以为当我们去看一个以接近光速的速度在运动的物体时，真的能观测到它的长度按 $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ 的比例缩短。例如，一个乘坐泛美航空公司飞机的人，在一架环球航空公司的飞机从他近旁向相反方向飞过时（这可违反了保险公司的规定！），会看到它的机舱缩到了机尾，而这架环球航空公司的乘客则会看到泛美航空公司飞机上发生了同样的事。特雷尔指出，这个概念是不对的，从我们对一个快速运动物体的视觉力的观点看来，它并不比它静止的时候显得短些。这是由于光速是有限的，当一架飞机从我们旁边飞过时，我们看到它头部和尾部发出的光将有不同的时间延迟，而这个时间差会抵消长度的相对论性收缩的效应。只有在光是以无限大的速度传播时，这一观察误差才不会存在，但若 $c=\infty$，则不论两个系统的相对速度的

数值是多少，这时长度的相对论性缩短总是等于零。

根据特雷尔的论证，虽然长度的相对论性缩短不能被一个观测者看到，但它还是用照相方法拍摄下来的，只要镜头的尺寸大于运动物体的长度。我们可以想象有一种特殊的照相飞机，装配有一架从机头一直伸到机尾的照相机。这架照相机必须有一组长长的圆柱形镜头和一个"瞬时快门"，即此快门的前端和尾端开闭是同时的(对飞机上所用的时间校准系统而言)。如果这架飞机遇到一个向着相反方向很快运动的认不出来的物体，并把它的照片拍下来，那么这张照片就能显示出相对论性长度缩短的全部特征。当然，如果这个认不出的物体也把照相飞机的照片拍下来的话，它也会给飞机的驾驶员打电报说，"你也变短了！"

本书不打算阐述洛伦兹变换的数学结论了，我们只想指出它所导致的一些最重要的结果。这些最重要的结果之一，是关于两个速度相加的问题。假如有一艘航空母舰以每小时 35 浬(约 40 英里)的速度横渡大洋，舰上有一个人骑着摩托车以每小时 60 英里的速度从舰尾驰向舰头(图 VI-8)。摩托车相对于水的速度是多大呢？在经典力学中，答案是简单的；每小时是(40+60)即 100 英里。然而，这个简单的速度相加法则在相对论性力学中就不对了。事实上，假如航空母舰和摩托车两者的速度比方说都是光速的 75%(这至少在原则上是可能的)，那就会使摩托车相对于水

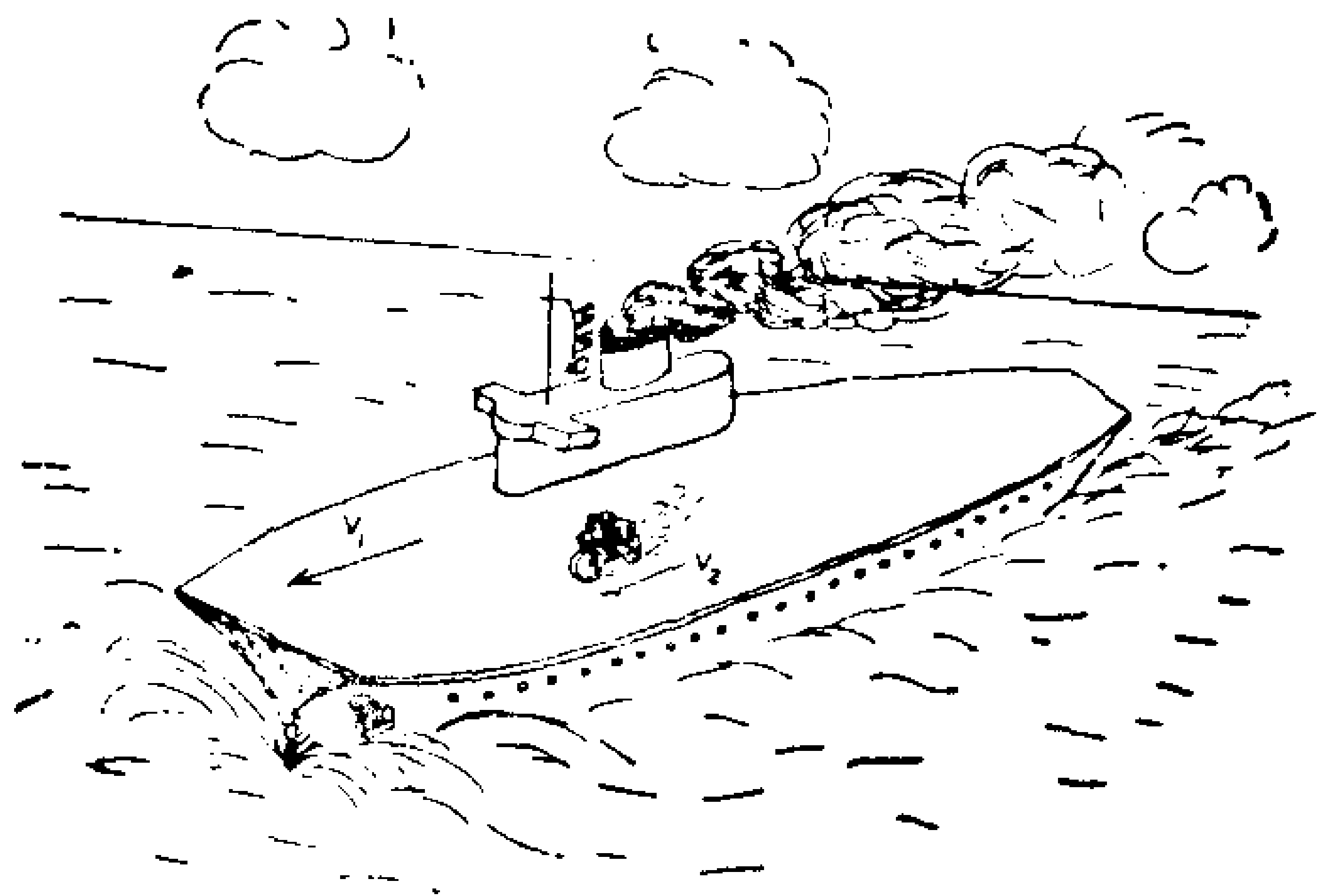


图 VI-8 两个速度的相对论性相加

的速度大于光速的50%了。两个速度 v_1 和 v_2 的相对论性相加的公式是：

$$V=\frac{v_1+v_2}{1+\frac{v_1\cdot v_2}{c^2}}$$

式中 V 是合成速度。不难看出，如果 v_1 和 v_2 都比光速小，则 V 也比光速小。事实上，即便 $v_1=c$，我们也只能得到：

$$V=\frac{c+v_2}{1+\frac{cv_2}{c^2}}=\frac{c+v_2}{1+\frac{v_2}{c}}=\frac{c\,(c+v_2)}{c+v_2}=c$$

这意味着任何速度与光速相加都不能使光速有丝毫的增加。如让 $v_1=c$，$v_2=c$，我们还是有

$$V=\frac{c+c}{1+\frac{c\cdot c}{c^2}}=\frac{2c}{1+1}=c$$

速度相加的相对论性公式解释了我们早先提到的那个大约在半个世纪以前所做的斐索实验。若将 v_1 代入水中光速的数值 $\frac{c}{n}$，将 v_2 简写成管中水的速度 v，就得到

$$V=\frac{\frac{c}{n}+v}{1+\frac{c\cdot v}{nc^2}}=\frac{\frac{c}{n}+v}{1+\frac{v}{cn}}$$

把分子分母同乘以$\left(1-\frac{v}{nc}\right)$，就进一步得到

$$V=\frac{\left(\frac{c}{n}+v\right)\left(1-\frac{v}{nc}\right)}{1-\frac{v^2}{n^2c^2}}=\frac{c\left(\frac{1}{n}+\frac{v}{c}-\frac{v}{n^2c}-\frac{v^2}{nc^2}\right)}{1-\frac{v^2}{n^2c^2}}$$

因为v远小于c，所以$\frac{v}{c}$是很小的数，$\left(\frac{v}{c}\right)^2$就更小了。这样，在上式中略去含$\frac{v^2}{c^2}$的项，就得到

$$V=\frac{c}{n}+v-\frac{v}{n^2}=\frac{c}{n}+v\left(1-\frac{1}{n^2}\right)$$

这正是斐索的经验公式。这样，流体运动时的“以太漂移”这种事情根本不存在，合成的速度只是光在液体中的速度与液体在管子中流过的速度的相对论性之和。

相对论性力学的另一个重要推论是运动粒子的质量不再象牛顿力学中那样总保持为常数，而是随着速度的增大而增加的。影响运动物体质量的因子与影响长度缩短和时间膨胀的因子是一样的，一个以速度v运动的质量由下式表示：

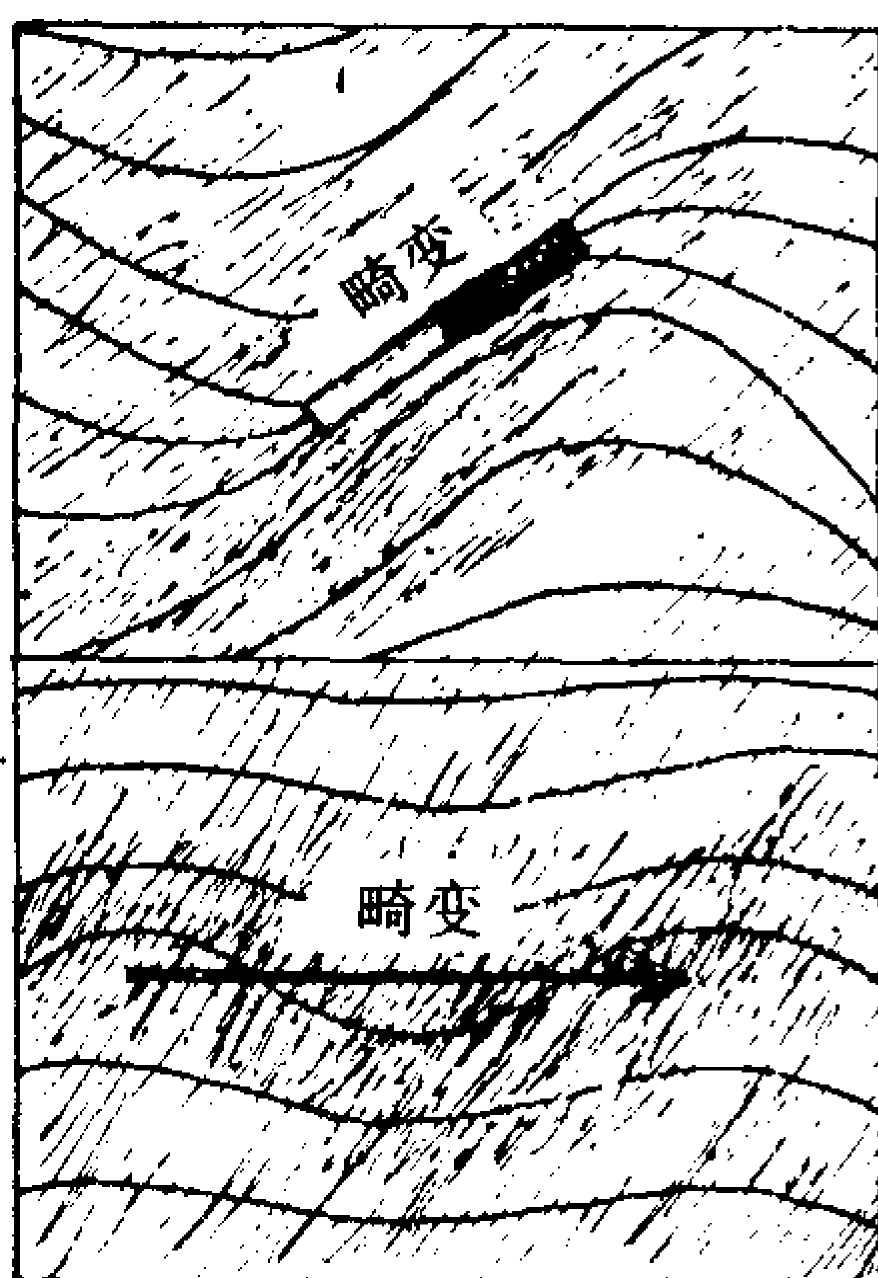
$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

式中m_0是所谓的“静止质量”，即对于趋使原来处于静止的粒子运动的力的惯性反抗能力。随着粒子速度的增大而接近光速时，速度的增大就变得越来越困难，当$v=c$时，反抗进一步加速的阻力就变成无限大。这就给我们提供了表述相对论的另一种基本说法，即任何物体都不可能比光运动得更快；事实上，由于惯性反抗力的增大，使物体加速到以光速运动所需要的能量将变为无限大。

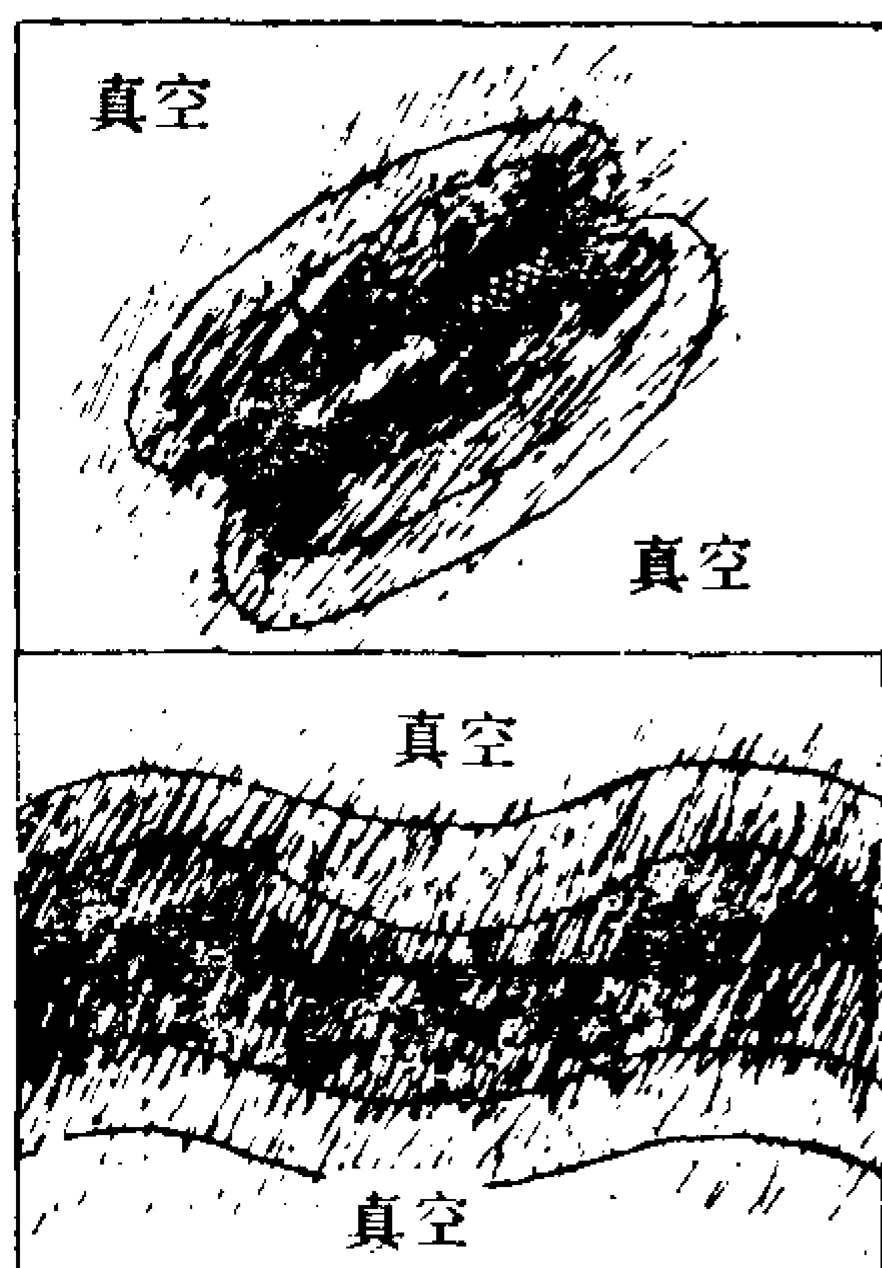
质—能的等价性

当爱因斯坦抛弃了宇宙以太的观念，使星际空间又回到它原来的真空状态时，他还得作一些工作来维护光波的物理实在性并且一般地维护电磁性的物理实在性。如果以太不存在，那么在电荷和磁石的周围是什么呢？是什么在真空中传播给我们带来太阳

和恒星的光呢？这只要把电磁场看成是某种物质的介质就可以了，尽管它和我们日常所熟悉的介质可以完全不同。在物理学中，“物质的”这个形容词相当于“可秤的”，即具有一定的重量或质量。因此，电荷和磁石的周围必须是某种可秤的实体，虽然它也许非常轻，但在它们附近较密，而向外越来越稀薄，在电力和磁力消失的地方变为零。同样，光线应当想象为这种物质的振动流，它从发光体射出（就象花园里的水龙管喷出水流一样），掠过完全虚空的空间。新旧观点之间的差别可大致用图 VI-9 来说明。以前认为宇



在爱因斯坦之前的想法



在爱因斯坦之后的想法

图 VI-9 关于电磁场的新旧概念。爱因斯坦以前，人们认为全透明的世界以太在电磁场区域畸变了，现在我们相信电磁场是存在于空间之中的一种物理实在（有重量的）。

宙以太是均匀分布在整个空间的，而电磁场仅被看成是其中的某种形变，现在则认为，新的“以太”物质仅仅存在于有电力和磁力的地方，它与其说是这些力的传递者，倒不如说就是物质化了这种力本身。这种物质的物理性质，不能用硬度、弹性这类旧日的术语来描述——这类术语只适用于原子和分子所组成的物体，而要用麦

克斯韦方程来描述，这些方程详尽地描述了电磁相互作用。这个新的观点需要一定的时间和努力才能掌握，但是它把人们的思想从旧日关于光的“拟物质的”观点(象在“拟人化”的观点中一样)中解放出来了。

但是，赋予这种新“以太”实体以可秤重的质量的论据是什么？应当赋予它多大的质量呢？回答这个问题的最好办法是让我们考虑一束光照射到一面镜子上并被反射回来的情况。物理学中很早就已知道，被镜面反射的光对镜子施加有一定的压力，其强度不大，放在一支蜡烛面前的镜子不致于被它推倒，但阳光却能推动彗星体在趋近太阳时所发出的气体分子。这些气体分子形成明亮的拖尾掠过空中。这种光压首先是由俄国物理学家列别捷夫在实验室里证明其存在的，并证明了它在数值上等于反射光能量的两倍除以光速。

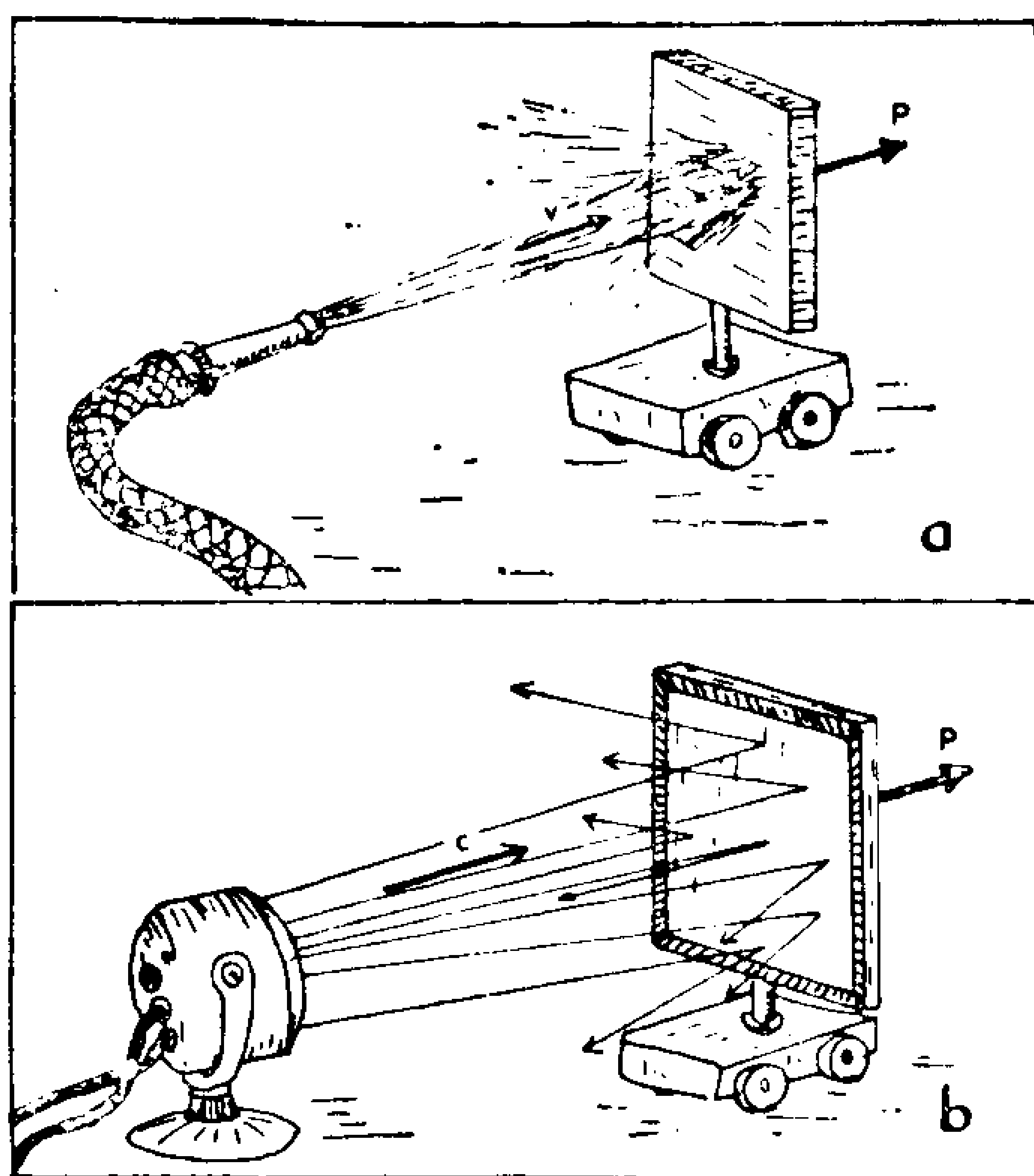


图 VI-10　水流在一个可移动的板上反射(a)，光束在一个可移动的镜面上反射(b)。

在镜面上反射的光束要对镜子施以压力，在力学上有一个很相似的类比，就是花园里的水龙带喷射出来的水流射到放在前面的一块板上时，要对它施以压力(图 VI-10)。按照经典力学定律，质点流对它们在上面反射的板壁所施加的压力，等于它们的动量

(用牛顿的术语来说就是“运动之量”，参看第四章)的变化率。如果m代表单位时间水流所传送的水的质量，v是水流的速度，则动量的变化是$2mv$，因为它是从$+mv$变到$-mv$。(实际上，$mv-(-mv)=mv+mv=2mv$。)

如果对一束在镜面上反射的光应用同样的论据，我们就必须认为光有一机械动量，它等于单位时间内落到镜面上的“光的质量”m乘以光速c。因此光压可以写成：

$$P_{光}=2mc$$

将此式与上面提到的经验关系式$P_{光}=\frac{2E}{c}$相比较，就可以得出如下结论：

$$m=\frac{E}{c^2} \quad 或 \quad E=mc^2$$

这就是著名的爱因斯坦“质能等价定律”，它认为经典物理学中“不可称重的”辐射能量与普通可以称重的质量是等同的。因为c^2是一个很大的数，即9×10^{20}，所以若用通常的单位来表示，辐射能量即使数量可观，其质量也是很小的。例如一个10瓦的灯泡每分钟能发射6×10^9尔格的光，其闪光轻于$\frac{6\times10^9}{9\times10^{20}}\doteq7\times10^{-12}$克。但是，太阳由于向周围空间倾泻大量的辐射而每天损失的质量将达4×10^{11}吨。

质量与能量之间的关系当然要推广到所有其它类型能量。带电导体和磁石周围的场，都成为一种可称重的物理实在，尽管一个一米直径的铜球被充电到一千伏的电势时，它周围的场只有2×10^{-22}克重，而普通实验室里用的磁石的场，也只能使天平倾斜10^{-15}克。

热能也必须有可称重的质量，一公升的水在100℃时比同样

数量的冷水重 10^{-20}克，而一个两万吨级的原子弹所释放的总能量约重 1 克。

有一种说法在报纸和通俗杂志的一些文章中广为流传，大意是说爱因斯坦的质能关系乃是发明原子弹的基础，对此我们要稍微讲几句。这种说法是完全错误的，我们同样有理由可以说，这个关系式提供了诺贝尔发明硝化甘油或瓦特发明蒸汽机的基础。在发生物理变化或化学变化的任何情况下，伴随有一定量的能量释放，生成物的质量就比原来成份的质量小，所小的质量等于放出能量的质量。例如，硝化甘油在爆炸中生成的气体，比爆炸物原来的重量小；从蒸汽机中出来的蒸汽，比锅炉里热水的重量小；木头燃烧时放出的气体和灰烬的重量，也比原来木块的小。但在所有这些情况下，放出能量的重量与原来物质的重量相比都是很小的，以致即使用最精密的天平也无法把它测出来。没有一个物理学家能够看到一杯热水和一杯冷水之间的重量差，至今也没有一个化学家能探测得出水的重量与生成水的气态氧和氢的重量两者之差。

在核反应的情况下，产生的能量要大得多。虽然我们不可能把炸弹的所有分裂碎块都收集起来，来证明它们的重量正好比原来的钚核心小一克，但是我们可以依靠一些灵敏的核实验方法，来确定个别原子质量的精确数值以及参与核反应的原子质量与反应中生成原子的质量之差，而所要的正是这个差。因此，爱因斯坦在原子弹发展中的作用并不是他提出了 $E=mc^2$ 这个公式，而是他曾写了一封信给罗斯福总统，由于爱因斯坦的权威力量，美国政府才开始将曼哈顿计划*付诸实施。

以一定速度运动的物体在其自身中携带着动能，这一能量所

* 译注：美国政府的原子弹发展计划。

对应的附加质量造成质量的相对论性增大。爱因斯坦质一能等价定律也适用于基本粒子的转化。要产生一对电子和反电子(或质子反质子对),必须提供相当于它们的合成质量那么多的能量,当一对粒子共同消灭时,则会以高频辐射的方式释放出同样多的能量。

四 维 世 界

相对论性的空间收缩在数学上相当于运动物体的斐兹杰惹收缩。但是,斐兹杰惹认为这种收缩是由于物体在以太中运动而引起的一种实在的物理效应,而相对论则把它看成是当我们从一个运动系统去观察时所看到的一种表观的距离缩短。空间的收缩和时间的膨胀对于两个处于相对运动状态的系统来说是对称的。空间距离一缩短,时间间隔就加长,这有点象一根具有给定长度 L 的棒的垂直投影和水平投影的情况一样。如果棒是水平放着的,则其垂直投影为零,而水平投影是 L。如果棒是垂直放着的,其垂直投影是 L,而水平投影是零。如果这根棒放在一定的角度 θ 处,则垂直投影和水平投影都不等于零。

但是,无论 θ 角多大,由毕达哥拉斯定理我们有:

$$\Delta x^2+\Delta y^2=L^2$$

这个类比使德国数学家闵可夫斯基(他的工作紧接在爱因斯坦早期发表的工作之后)得出结论说,时间多少可以看成是三个空间座标之外的第四个座标,而一个系统相对于另一个系统的运动,可以看成是这个四维座标架的转动。

在日常生活中我们是按照不同的地点和时间来区分不同的事件的,我们说,会议将于下午八点在第 6 路第 32 街*的十五楼举

* 译注:美国习惯把南北向的街道称为路,东西向的称为街,这里的意思是指第 6 路和第 32 街的路口。

行。通常我们是按时间表画位置，作出一些图来，这些图与那些表示每月股票市场价格变化的图没有多少不同，无非都是用图形来表示两个相互有关连的量之间的依赖关系，在任何意义上都不能认为它们要遵守某种标准的几何法则和规定。如果把时间当作合法的第四个座标，那首先就得和三个空间座标一样，用相同的单位来度量它。为此我们可以把原先用秒为单位的时间乘以某个标准的速度，而得到用厘米来表示的距离，这就与三个空间座标一样了。为了达到这个目的，若随便选择一个速度单位，例如选择公路上的极限速度（它与地方立法有关）亦或声音的速度（它与物质和温度有关），那是不合理的。显然，最好的选择是真空中的光速，它与自然界的基本定律有着明显的联系，而且迈克尔逊-莫雷实验已证明它是不变的。因此，我们用 x、y 和 z 表示前三个座标（空间座标），用 ct 表示第四个座标（时间座标）。但这只是我们必须做的第一步。空间座标 x、y 和 z 三者之间都是可以自由交换的，如果我们把一只木盒转过 90°，它的长度就变为高度。对于时间座标和空间座标，这样完全的交换是不能存在的。否则，一架时钟就会变成一根码尺或者码尺要变成时钟了！因此，如果把时间看成第四个座标的话，不仅要把它们乘以光速 c，而且还要乘上另一个因子，得使四维座标系的和谐性既不遭受破坏，而时间座标又会在物理上与三个空间座标不同。数学可以给我们提供这样一个因子，它称为“虚数单位”，用符号 i 来表示。虚数单位的定义是 -1 的平方根：

$$i=\sqrt{-1}$$

根据初等代数，$(+1)^2$ 等于 $+1$，$(-1)^2$ 也等于 $+1$，所以 i 这个数在普通的正数和负数中是没有位置的，因此被称为虚数单位。对于普通计数它毫无用处，有 £1 意味着你的银行存折中有一镑钱，

有£(-1)则意味着你欠一镑钱，而£i则对于银行管理没有任何意义。

但是，数学家和理论物理学家却发现使用i来计算是很方便的，只要在最后需要作出物理解释的结果中把它消去就是了，而在最后的结果中总是只含i的平方，因为$i^2=-1$，所以它是一个普通的负数。因此，让我们就用“虚数单位”作为这个附加的公因子，而把第四个座标写成ict。因为我们不可能画出四个互相垂直的轴，所以我们略去第三个座标z，而用新的时间座标ict来代替它，结果如图VI-11所示，其中空间座标轴x和y位于水平面上(相对于读者而言)，而虚的时间轴在垂直位置上。这张图上的每一点各代表一个事件，即发生在确定地点、确定时间的某一事件。同时发生的事件(对于图中画出的特定参照系来说)用一些垂直于时间轴的平面上的点来代表。发生在同一地点但不同时间的事件(也是对这个特定的参照系而言)，都是处在平行于时间轴的直线上。张开90°的锥面称为“光锥”，它相当于能够用光信号来联系的事件。例如，A点(事件)代表一个发射光波的闪光，则B点就相当于处在空间某处的物体被该光波照亮的事件。

如前所述，当我们从一个运动系统观察空间和时间间隔时，可以在几何上解释为一个四维座标架的转动，将时间轴转动了一定的角度(图VI-11中的虚线及其字母)。但是，因为运动速度决不能超过光速，所以ict轴所转过的角度θ决不能大于90°。这样，我们可以把事件对分为两种不同的类型：

1）象E和F这样的事件，它们的连线EF与时间轴所成的角度小于90°。在这情况下，我们可以找到一个运动座标系，它相对于原来座标系的速度恰好使得这两个事件处在新的时间轴ict'上，而且它们的空间距离变为零。这类时空轴的转动是很平常的，

日常生活中都可以碰到。例如，若是我们想在星期一到一个城市看一场足球赛，在星期二到相距几百英里外的另一个城市去看另一场，我们就在第一场结束之后立即驱车离开而在第二场开始之前到达那里。虽然这两个场地的位置相对于赤道和格林威治子午线来说是不同的，但它们相对于固定在汽车上的座标系而言实际上是在同一地点。上述这两个体育事件的时空间隔称为类时间隔，因为在以适当速度运动的座标系变换下，它们的空间间隔可以缩短为零，而在同一地点(汽车座位上)和不同时刻(相隔一天)去观察它们。

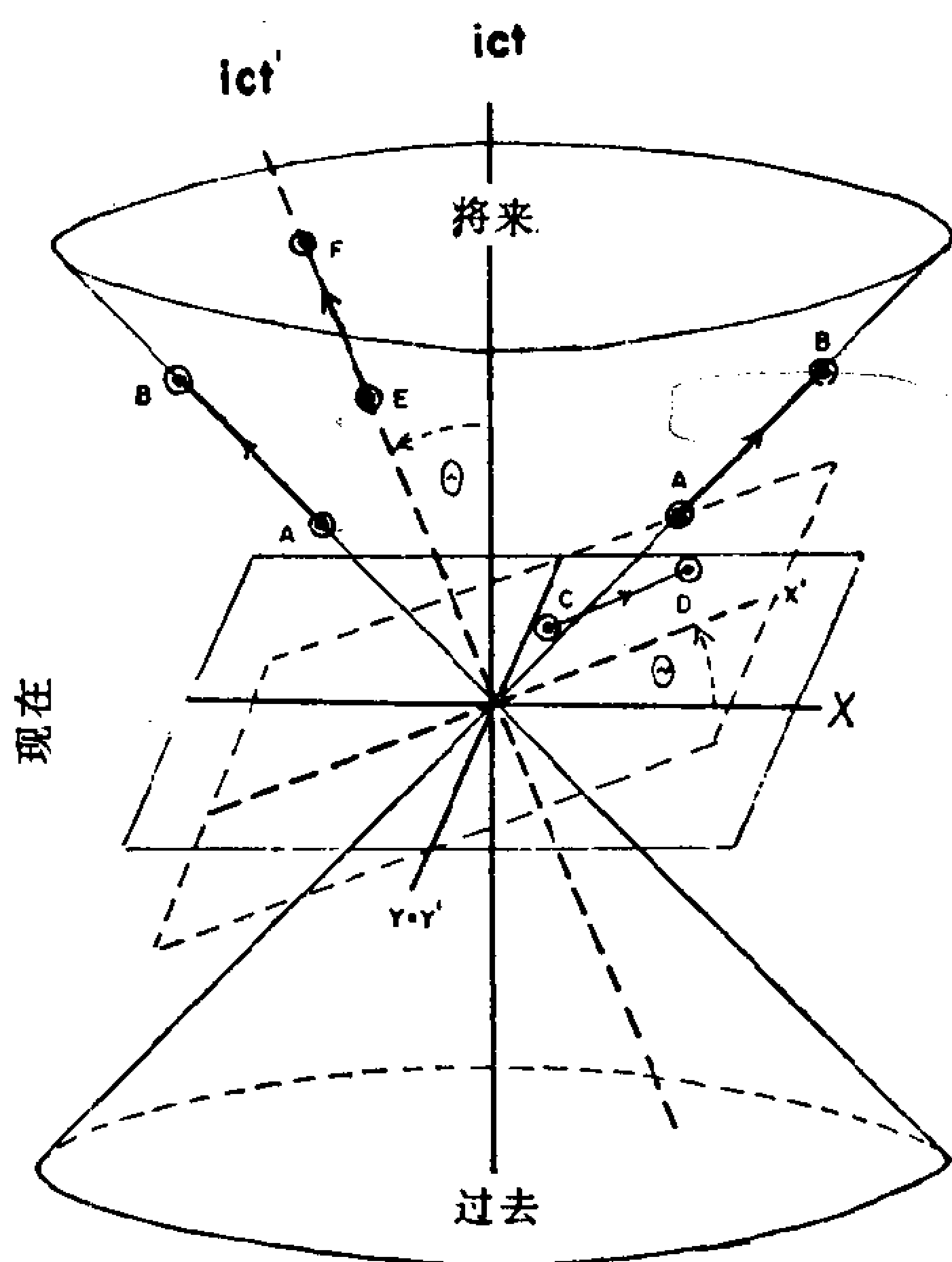


图 VI-11　包含两个空间座标 (x 和 y) 及时间座标 (ict) 的时空连续统。锥面表示光的传播 [$x^2+y^2-c^2t^2=0$]，它把时空连续统分成了“现在”、“过去”和“将来”。

2) 象 C 和 D 这样的事件，连线 CD 与时间轴之间的角度大于 $90°$。在这情况下，我们不能从第一个事件达到第二个事件，除非我们运动得比光还快。例如，光从水星运动到冥王星大约需要 5 小时 20 分，我们不可能在水星上出席一点钟的午餐会而在同一天的五点钟到冥王星上参加鸡尾酒会。但是，我们总可以选择一个

适当的旅行速度，把这两个事件的时间差缩短为零，使它们在我们所选择的时空座标系中是同时发生的。这种成对事件的时空间隔称为类空间隔，因为通过适当方式的运动，我们可以把时间差缩短为零。

现在我们可以给以前关于“过去、现在和未来”的旧观念下一个新定义了。如果我们考虑自己是在图VI-11中所示的座标原点上，并说：“我现在($t=0$)是在这儿($x=0, y=0, z=0$)”，那么，所有处在光锥上部的事件(t为正)都是未来的事件，因为不论我们怎么运动，在看到它们之前都要经过一定的时间。我们可以做些事情来影响这些未来的事件，但是不能受它们的影响。同样，所有位于光锥下部的事件(t为负)都是过去的，因为我们无论运动得多快也不能看到它们了。例如，我们不可能以如此快的速度飞出去进入空间，以至能捕捉到第一颗原子弹爆炸和罗马大火所发出的光波。这些过去的事件能够影响我们，但我们不能影响它们；在光锥上部和下部之间，是我们普通称之为“现在”的“无人地带”。其中所包括的事件或者在我们看来是同时的，或者可以使其是同时的，只要我们从一个运动参照系去观察它们，而这个参照系的速度比光速小。图VI-11中的“现在”占据着很大的空间，这当然是因为我们决定用ct而不是只用t来计算时间间隔。如果用t而不用ct来画图，垂直方向的刻度就会缩小3×10^{10}倍，光锥的上部和下部就要变宽，它们之间的空间就会缩小到实际上没有什么了。这就是我们在速度与光速相比小得可以忽略不计的日常生活里所看到的情况。

现在让我们回到三维的空间并引入z座标，我们可以在表示第四个座标时对“虚数单位”运用某些数学技巧。假定我们在时刻$t=0$从空间座标的原点$x=0$, $y=0$和$z=0$送出一个光信号。在

时刻 t 时，这个光信号到达某个位置，其空间座标是 x、y 和 z，根据毕达哥拉斯定理，它到座标原点的距离是：

$$\sqrt{x^2+y^2+z^2}$$

因为光永远以速度 c 传播，所以这一距离必须等于 ct，故可写成：

$$\sqrt{x^2+y^2+z^2}=ct$$

或

$$x^2+y^2+z^2=c^2t^2$$

或

$$x^2+y^2+z^2-(ct)^2=0$$

但因为 $-1=i^2$，故上式可改写成：

$$x^2+y^2+z^2+(ict)^2=0$$

此式左边是四维空间的毕达哥拉斯平方和。在相对于原来座标系运动的带撇的座标系中，我们将有

$$x'^2+y'^2+z'^2+(ict)^2=0$$

所以这四个平方之和在四维座标系的转动下是不变的，利用洛伦兹变换我们可以证明，这对于(x, y, z, ict)空间中代表两个事件的任意两点的空间时间间隔都是正确的。因此，两个事件不论是从哪个参照系去观察，表达式 $x^2+y^2+z^2+(ict)^2$ 都是不变量（即不能改变的量）。它们的三维空间间隔和一维时间间隔可以改变，但由上一表达式所决定的四维间隔则总是保持不变。因此，使用 ict 作为第四个座标后，我们就达到了空间和时间的数学统一，从而可以把所有的物理事件都看成是发生在四维的时空世界里。但是我们不要忘记，我们所以能够做到这点，只是因为用了“虚数单位”，它是一个虚假的辅助工具，当我们丢掉这张牌而追求真正的数值时，空间和时间就完全不是一回事了。

相对论性引力理论

如前所述，爱因斯坦的相对论可以看成是伽利略关于在一个匀速航行的船舱里做力学实验时所提出的那些论证的光辉顶点。这个理论推广到非匀速运动时，常被称为广义相对论，但最好是把它叫做相对论性引力理论，它在伽利略的实验中也有其根源，那就是把轻重物体从比萨斜塔扔下来的实验。轻重物体下落的加速度完全相同，这个经验事实多少年来一直是一件完全不可思议的事情。直到爱因斯坦在1914年发表了讨论加速度与引力之间关系的论文，才弄清了问题。

在这篇论文中，爱因斯坦描述了一些假想实验，它们是在一个自由漂浮于星际空间的封闭房间里进行的。由于不存在引力，房间里所有的物体都没有向任何方向运动的趋势。但是，如果这个房间被加速，例如被几个装在它下面的火箭发动机所加速，那么，室内的情况就完全不同了：这时所有的物体都要被压向地板，就好象有一个引力把它们往下拉一样。如有一个人站在这个以均加速度 a 在运动的空间实验室里的地板上，他手上有两个球，一轻一重。由于整个系统有加速度，这个人的双脚就会牢牢地压在地板上，两个球也会压迫他的手掌。现在，如果他同时松开这两个球，会发生什么情况呢？因为两个球都不与火箭体相连，所以它们将继续以松手瞬间所具有的速度运动，因此保持并排的位置。但是，因为火箭运动是加速的，它的速度要继续增加，室内地板很快就会赶上这两个球，并同时碰到它们。在此碰撞之后，两球就会一直被压在地板上，而与整个系统一起被加速了。但在室内的观察者看来，这两个球在他松手后是以相同的加速度开始下落的，因此它们同时击中地板。这就是加速度与引力的等效原理，它在我们今天

所处的“空间时代”是一个常识问题。

但是，在一个加速的宇宙飞船里和一个地球这样大质量所产生的重力场里发生的力学现象的这种相似性，纯粹是一种巧合呢，还是与引力的本质有更深刻的联系呢？爱因斯坦深信事实是后者，他并提出了这样一个问题；在此情况下，光线在一个加速舱里的行为会如何？试想有一盏闪光灯装在舱内墙壁上，向对面发出一束光。为了观察光线经过的情形，我们可以在它经过的路等距离地放几块萤光玻璃板（图 VI-12）。如果密封舱没有加速度，光束在玻璃板上穿过的各点当然是在一条直线上，因此我们无法知道飞船对于固定星球来说是静止的还是处在匀速运动状态。然而，如果飞船舱是以匀加速度 a 运动，情况就完全不同了。光到达第一块、第二块、第三块……玻璃板所需要的时间，按算术级数 1，2，3……而增大，而以恒定加速度运动的飞船的位移则按几何级数 1，4，9……而增加。这样，光束在萤光玻璃板上的径迹将构成一抛物线，就象水平抛出的石块的轨迹一样。因此，如果把加速度与引

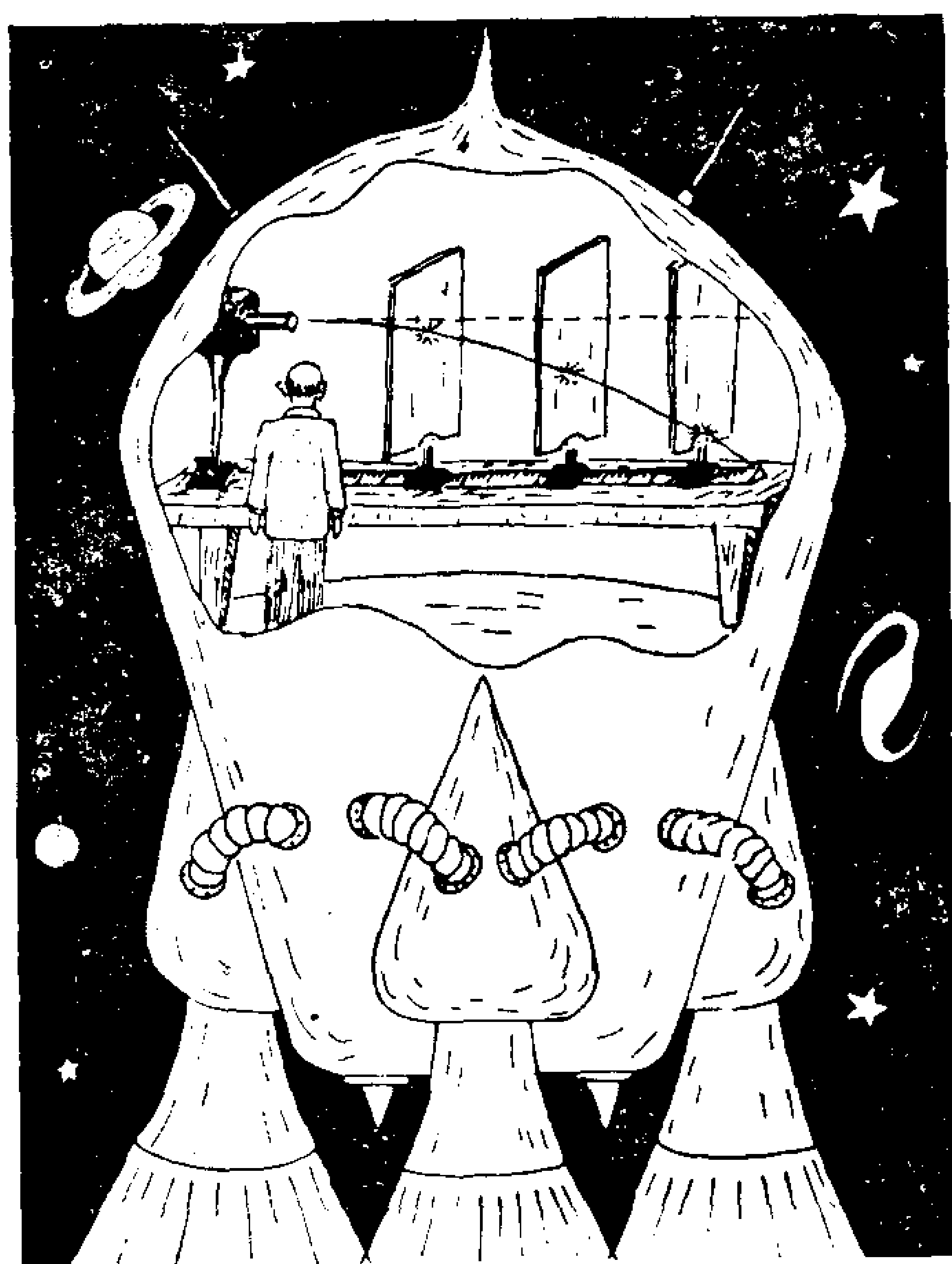


图 VI-12　加速运动的宇宙飞船中的光学实验，它启示我们，光在引力场中一定会弯曲。

力等效原理推广到电磁现象，光线在引力场中必定是弯曲的。但是，由于光速极高，它在地球引力场中的弯曲太小，因而观察不到。事实上，如果一束水平光线在到达光屏之前比如走了 30 米，则它通过整个距离的时间是$\frac{3\times10^3}{3\times10^{10}}=10^{-7}$秒。因为地球表面的重力加速度的数值约为 10^3 厘米/秒^2，所以光线到达屏上时的垂直位移应为

$$\frac{1}{2}\times10^3\times(10^{-7})^2=5\times10^{-12}\ \text{厘米}$$

这与原子核的直径都可以相比了！

然而爱因斯坦认为，如果光线在太阳表面附近经过，也许有希望明显看到它们的偏转。下面是对预期偏转的一个粗略估计。太阳表面附近的重力加速度是引力常数 (6.7×10^{-8}) 与太阳质量 (2×10^{33}克)的乘积除以太阳半径(7×10^{10}厘米)的平方，即是

$$\frac{6.7\times10^{-8}\times2\times10^{33}}{(7\times10^{10})^2}=3\times10^4\ \text{厘米/秒}^2$$

光在太阳引力场中经过的距离可与太阳的直径 (1.4×10^{11}厘米) 相比拟，而所花的时间约为 $\frac{1.4\times10^{11}}{3\times10^{10}}\approx5$ 秒。在这段时间里，光束“落下”的距离是 $\frac{1}{2}\times3\times10^4\times25=3.7\times10^5$ 厘米，偏转角将为 $\frac{3.7\times10^5}{7\times10^{10}}=6\times10^{-6}$ 弧度，即约为一角秒。

更准确地计算光线在太阳表面附近通过时的偏斜，得到的结果是 1.75 角秒。太阳附近的恒星只能在日全食期间看到，所以英国天文探险队在 1919 年去到了非洲，当时那里正在发生日全食。(德国天文学家因为战争封锁而没能去成。) 结果完全证实了爱因斯坦的预言。当人们把这些结果告诉爱因斯坦时，他只是付之一笑说，假如实验结果是否定的，他会大吃一惊呢！对理论的这一证

实以及其它一些证实，毫无疑问地证明了引力场中和加速系统中所发生的现象是相互有联系的。

引力与空间弯曲

人人都知道曲线或曲面的意思是什么，但要理解三维弯曲空间的意义就需要一定的想象力了。建立弯曲空间概念的困难在于，我们可以从外界去观察一个面，看到它是平面还是曲面，但我们自己生活在空间之内，无法从它走出来去观察它。讨论弯曲空间性质的最好办法就是运用类比，想象有一些两维的人生活在一个面上，他们根本想不到会有一个方向垂直于他们生活的面。他们怎么能知道自己住在上面的这个面是否平面、球面或是别的什么面而不需要从它跑出来呢？答案当然是他们应当研究他们面上的几何学：画出各种图形，测量角度等等。在图 VI-13 中我们举了一个例子，这些两维的几何学家正在研究画在平面上、球面上和所谓"马鞍面"上的三角形。

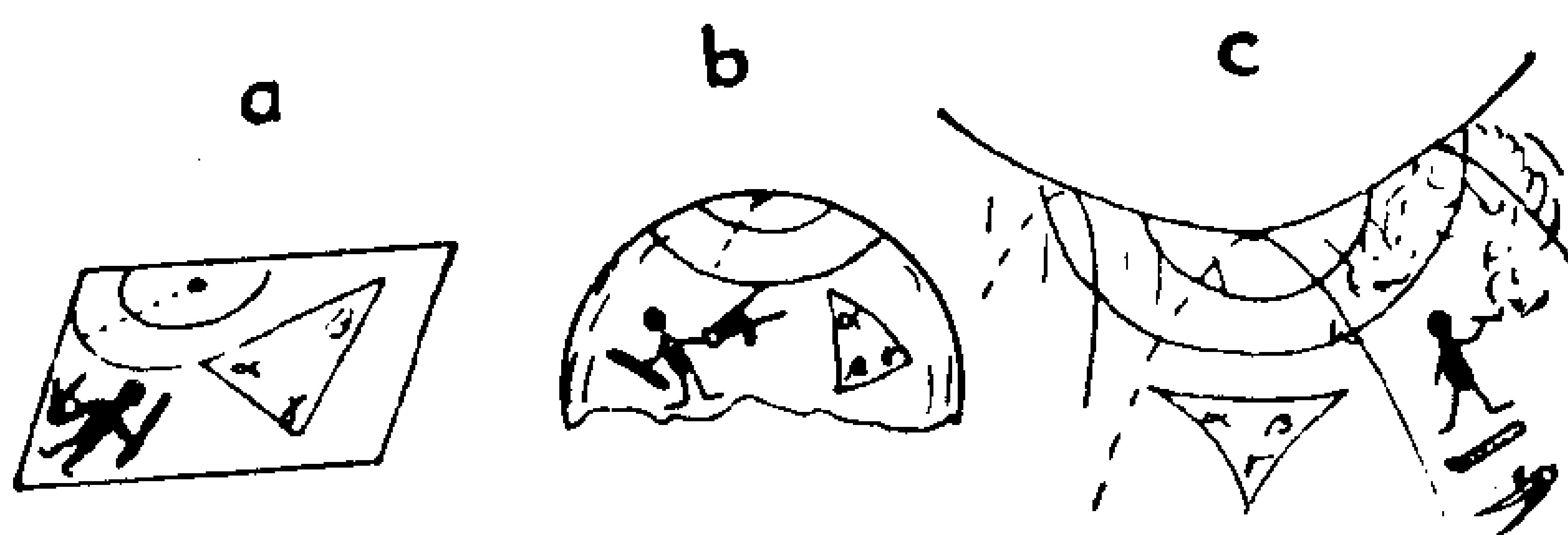


图 VI-13　三种不同形式的两维曲面，a)平面：零曲率，b)球面：正曲率，c)马鞍面：负曲率。这三种情况之间的差别可以在两维人研究圆或三角形几何学时被他们发现。

如果它是平面(a)，欧几里德平面几何的法则就适用，他们总是发现三角形的三内角之和等于 180°。在球面上(b)，三内角之和总是大于 180°，只要我们在地球上画一个三角形，由两条半截的子午线和它们之间的一段赤道构成，就不难看出这一点，因为子

午线与赤道相交成直角，所以我们这个球面三角形的两底角之和已经是 180° 了。此外还得加上极点处的顶角，它也可能是很大的。若球面三角形较小，三内角之和便接近等于 180°，但仅仅在三角形无限地小于它画在其上的球面时，这一差别才会消失。在马鞍面上(c)，情况又不同，这时三内角之和小于 180°，通常认为球面具有正曲率，而马鞍面具有负曲率。

我们可以把这些结论推广到三维空间的情形，我们说空间是平的，还是具有正曲率或负曲率的，要看在这空间中任意三点之间所画的三角形内角之和是等于、大于还是小于 180°。让我们考虑一个大尺度的三角测量实验：三个天文学家各自带着经纬仪跑到地球、金星和火星上，去测量三角形 EVM 的三内角。因为我们在上一节中谈到，光线在太阳的引力场中要偏转(朝着引力体弯曲)，构成这三角形的三条光线看起来便如图 VI-14 所示，这些天文学家将发现三内角之和要大于 180°。这样，我们的天文学家就会得出结论说，太阳周围的空间是弯曲的，并具有正曲率。如果再用远离太阳的行星例如木星、土星和天王星来测量，光线在太阳引力作用下的偏转就比较小，三内角之和就比较接近于 180°了，这表明太阳周围空间的曲率随着到太阳距离的增大而减小。可能有人不同意这一测量的上述解释，认为天文学家所测量的实际上不是一个正规的三角形，因为它的边不是直线。但什么是直线呢？它的唯一合理的定义是"视线"，而视线正是光在真空中传播的线！我们也可以把直线定义为"两点之间最短的距离"，但整个光学都是以光线永远走最短路径这个假定为基础的。只要我们认真想一想，就发现此外没有什么别的合理办法来定义直线了，图 VI-14 中的实线必须看成是"弯曲"空间中的"直"线，而图中所示的虚线，则完全没有物理意义。为了避免名称上混淆，"直线"这个词只限于

用来表示平面几何中的最短距离，而在曲面上和弯曲空间中，我们改用“测地线”来代替它。这样，在一个球面上，与直线相当的便是大圆的弧，我们就用它们来构成球面三角形。这里我们也许注意到，在球面几何中，“平行线永不相交”这个欧几里德的老命题不再有效了，因为任意两个大圆总是相交于两点，从赤道上两点沿着垂直于赤道的平行方向起飞的飞机，如果飞行中不改变航向，就会在到达极点时相撞。

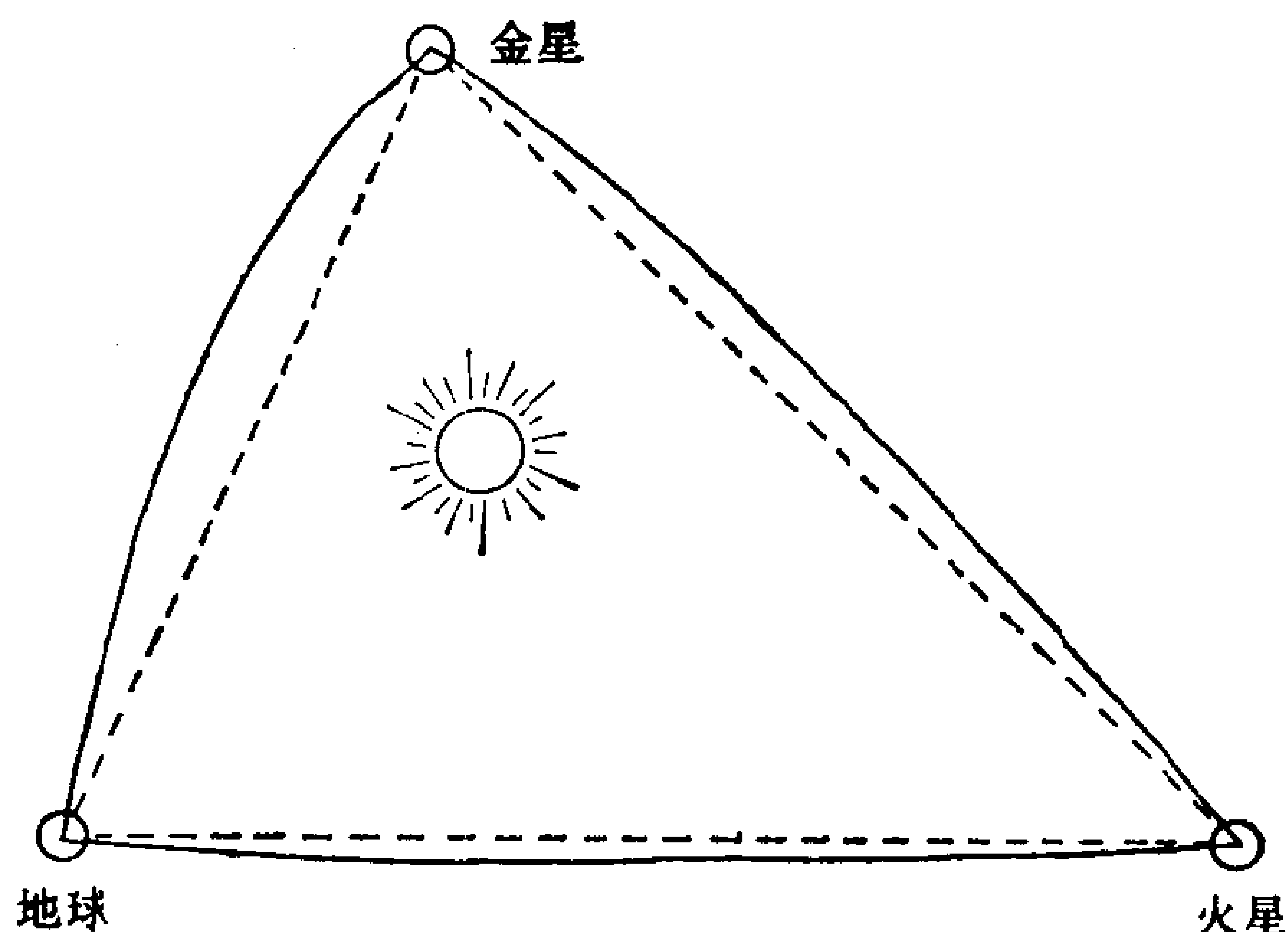


图 VI-14　太阳周围空间中的三角测量

引力场与空间弯曲之间的等价性，可以通过下面一个两维的例子得到进一步的澄清。假如我们让一只弹子球在一张平坦的水平桌面上滚动，它当然会沿着平常的直线运动。但是，如果由于某种原因在球的路径上桌子有一个浅坑和一些稍微凸起的地方，球就会偏离它的“直线”路径，而转向浅坑的中心，离开凸起的顶点。如果我们从桌子上方（通过天花板上一个小孔）去观察球的运动，我们将看不到桌面的缺陷，而一定以为有某个力，从桌面上某一点

吸引或推斥着这个球。同样，光线和运动物体在太阳附近的偏转既可以解释为作用于它们上面的力，也可以解释成是大质量周围空间弯曲的结果。

让我们现在从另一角度来考察我们的问题，考虑观测者坐在一个转动的大平台上所看到的物理现象(图 VI-15)。这个假想实验类似上一节中讨论到的爱因斯坦封闭舱的情况，但不同的地方

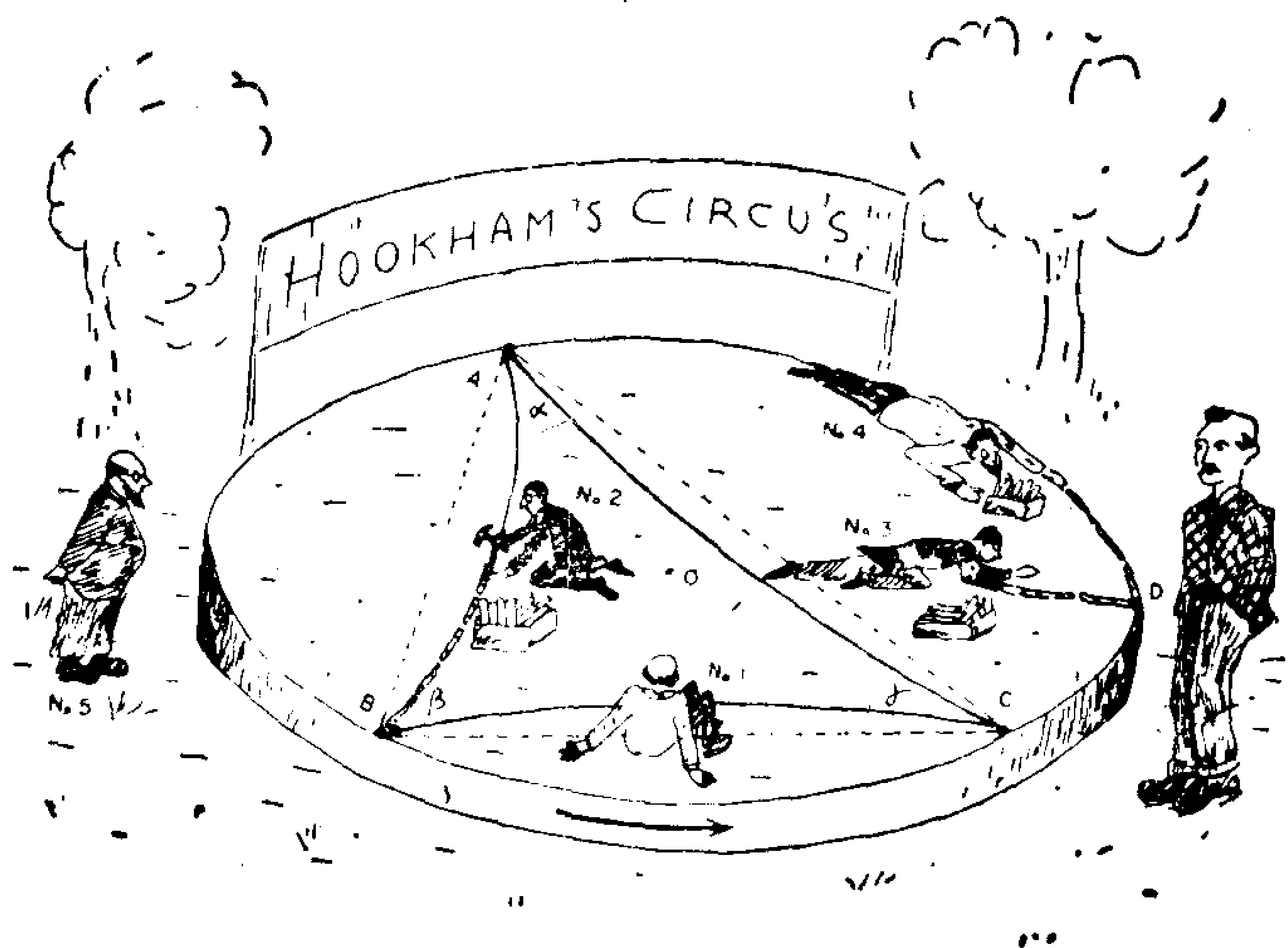


图 VI-15 在转动平台上的几何研究

是，这里涉及到的不是线加速度（即速度的数值改变，而方向不变)，而是角加速度(速度的方向改变，而数值不变)。我们可以给这个转动平台装上一个跟它一起转动的半球形屋顶，不让里面的人看到周围的树木和房屋在转动。大家知道，转动平台上的人会受到一个离心力，把他们从平台的中心向外推，他们可以把这解释为一种特殊的重力，它是斥力而不是吸力。它相当于一种重力可由下一事实得进一步的证实：假如上面有一个人牢牢地固定在台

上，并把两个球放在台上，两球一轻一重，它们会并排地一起滚动，其情况很象是从塔上掉下的两个物体。因为台上的人都是训练有素的物理学家，他们都熟悉我们在本章前面所介绍的全部论点，所以他们可以把这个“膺引力场”与空间几何联系起来，并试图进行某些几何测量。首先，他们可以做一个以A B C为顶点的三角形，并测量其内角之和。应用直线是两点之间最短距离的定义，第二个物理学家（第一个物理学家是首领，监督他们的工作）拿着一箱长度正好等于标准长度的木棒，并力图用它们在AB两点之间钉成一条线，而且要求尽量少用它们。如果平台不转动，达到这个目的的最好路线应是图中所示的虚线。但在转动的情况下事情就不一样了。木棒现在在其长度方向有运动，因而要遭受斐兹杰惹收缩；事实上，站在地面上的第五个物理学家将完全相信这一点。中央的木棒正好沿着其长度方向运动，所以遭受全部的斐兹杰惹收缩，靠近边缘的木棒则至少在其长度方向有一速度分量。由于收缩，木棒之间就会出现空隙，第二个物理学家只好再多加一些木棒才能使它们连成一条线。但是，对于这件麻烦的事至少有一个部分的补救办法；如果把木棒向平台中央移近一点儿，它们的线速度以及它们的收缩就会减小一些，需要增加的木棒也就少些了。这样，第二个物理学家将会象图中所示的那样来摆木棒，并且对三角形的另外两个边也不得不这样做。三内角之和现在就会小于180°，而台上的物理学家将会得出结论说，他们的空间具有负曲率。

我们可以补充一点：若是这些物理学家决定要用光学方法检验上述结果，他们也会得到同样的结论。事实上，因为离心力场在各方面都类似一个提供斥力的重力场，所以连接A，B和C三顶点的光线会对平台的中央偏折，与木棒所摆的路线一致。

现在，台上另外有两个人，即第三个和第四个物理学家，在做些不同的事。他们力图测量圆周的周长与直径之比，在平面几何中，它是用希腊字母 π 来表示的。这时平台的转动也起了破坏作用；虽然第三个物理学家不会遇到什么麻烦，因为他用的木棒是垂直于其长度方向运动，它们只会变细而不改变长度，但第四个人所用的木棒将遭受最大的斐兹杰惹收缩，他必须用大量的木棒。这样，在台上测到的周长与直径之比就大于平面几何中所用的数字3.1416……。这个结果再一次肯定了空间具有负曲率的结论。

让我们再回到两维的曲面，看看在它们上面画圆时情况如何。在地球上以极点为中心所画的圆称为“纬度圈”，很明显，纬度圈的长度与其直径（沿子午线测量的）之比小于 π 这个数。事实上，赤道（第零个纬度圈）的长度除以子午线的长度只有 2。纬度圈长度的增加要比它们沿子午线测得的半径的增加慢些，对于第 80、第 70、第 60 等等个纬度圈（其半径为 10 度、20 度、30 度等等），它们长度的增加比 1、2、3 等等慢些。同样，这些纬度圈内表面积的增加，也比 1，4，9 等等慢些。马鞍面上的情况正相反，这时圆周的长度比其半径增加得快些，面积也比半径的平方增加得快些。如果我们从足球上割下一块皮，把它放在桌子上，它的中间将是凸起的，要想把它弄平就得把它的周围拉开。相反，从马鞍上割下一块皮就显得边缘上的皮子太多了，要收缩一些才能把它弄平。按此类推，我们就必须认为一个转动实验室里的空间是具有负曲率的。

在三维空间的情况下，球的表面积增加得比 r^2 慢，其体积增大比 r^3 增加得慢则是正曲率的，负曲率空间的情形正相反。这个数学结果给天文学领域中一件很有趣的工作提供了基础，那就是多年前哈勃在威尔逊天文台所完成的一项工作。哈勃是研究星系的一位伟大的专家，在大型望远镜的视野里，有亿万个星系散布在

宇宙空间中。哈勃决定要研究一下，离我们远近不同的星系的数目是与这些距离的立方成正比的增加，还是比它们增加得慢些或是快些。如果第一种可能性对，我们就必须得出结论说，宇宙空间是欧几里德空间。在第二种情况下，空间具有正曲率，因而最终要自己围拢起来。在第三种情况下，空间具有负曲率，它在各个方面是敞开的。可惜，当时测量星系际距离的技术尚未充分发展，哈勃的测量结果是自相矛盾的，因而不得要领。我们希望，用更好的观测工具重复哈勃的"星系计数"的实验后，能对这个重要的宇宙学问题作出解答。

在上述考虑的引导下，爱因斯坦提出了一种理论，认为所有的引力相互作用都应当解释成是空间弯曲的结果。对爱因斯坦来说幸运的是，任意维数弯曲空间的详尽数学理论早在几十年前就已由德国数学家黎曼建立起来了，所以爱因斯坦只要把现成的数学公式应用于物理上实在的弯曲空间就行了。它当然是一个四维的空间，其座标是本章前面已经讨论过的 x，y，z 和 ict。爱因斯坦把时空连续统的所谓"曲率张量"与质量的分布和运动联系起来（这个基本公式在图 VI-6 中的爱因斯坦像下写出），在一级近似下到了牛顿引力理论的全部结果。而更精确的计算则表明，它与牛顿原来的理论一定有些微小的偏差，这些偏差的发现，必将证明爱因斯坦的观点比牛顿的优越。爱因斯坦引力理论的结论之一，就是我们已经讨论过的光的路径在引力场中要偏转。另一个重要之点是关于行星绕太阳运动的问题。牛顿曾证明，依据他的引力定律，行星一定是沿椭圆轨道绕太阳运动的，它与开普勒发现的经验规律相符。在爱因斯坦的理论中，所有的运动都要看成是在四维世界（x，y，z，ict）中的运动，有引力场存在，这个四维世界是弯曲的。表示任何一个物体在四维世界中"运动历史"的代表线，称为

该物体的"世界线"，它们一定是"测地线"，即最短的线，并且可以根据相对论性引力场理论把它们计算出来。

在图 VI-16 中，我们画出了地球绕日运动时的世界线。两个空间座标 x 和 y 画在椭圆平面上，第三个是时间座标 ict。太阳附近的时空连续统是弯曲的，地球的世界线在这个弯曲空间中相当于一条最直的线（即测地线）。例如，$ABCD$ 线是这个三维时空连续统中 A 和 D 两点（事件）之间最短的距离，它在 (x, y) 平面上的投影便是地球绕日运动的轨道。然而精确的计算表明，这个椭圆并不是象牛顿理论所指出的那样在空间保持固定不变，而是要跟着它的长轴一起缓慢的转动，每绕太阳转一圈它就转过一个很小的角度。这个效应对于水星轨道一定最为明显，因为水星轨道比其它行星的轨道都拉得更长一些，离太阳也最近。爱因斯坦曾算出水星的轨道每个世纪要转过 43 角秒，从而解决了天体力学中一个古老的不解之谜。早在爱因斯坦诞生之前很久，数学天文学家就已算出水星轨道的长轴由于太阳系中其它行星引起的摄动，即引力干扰，一定要缓慢地转动。但在计算和观

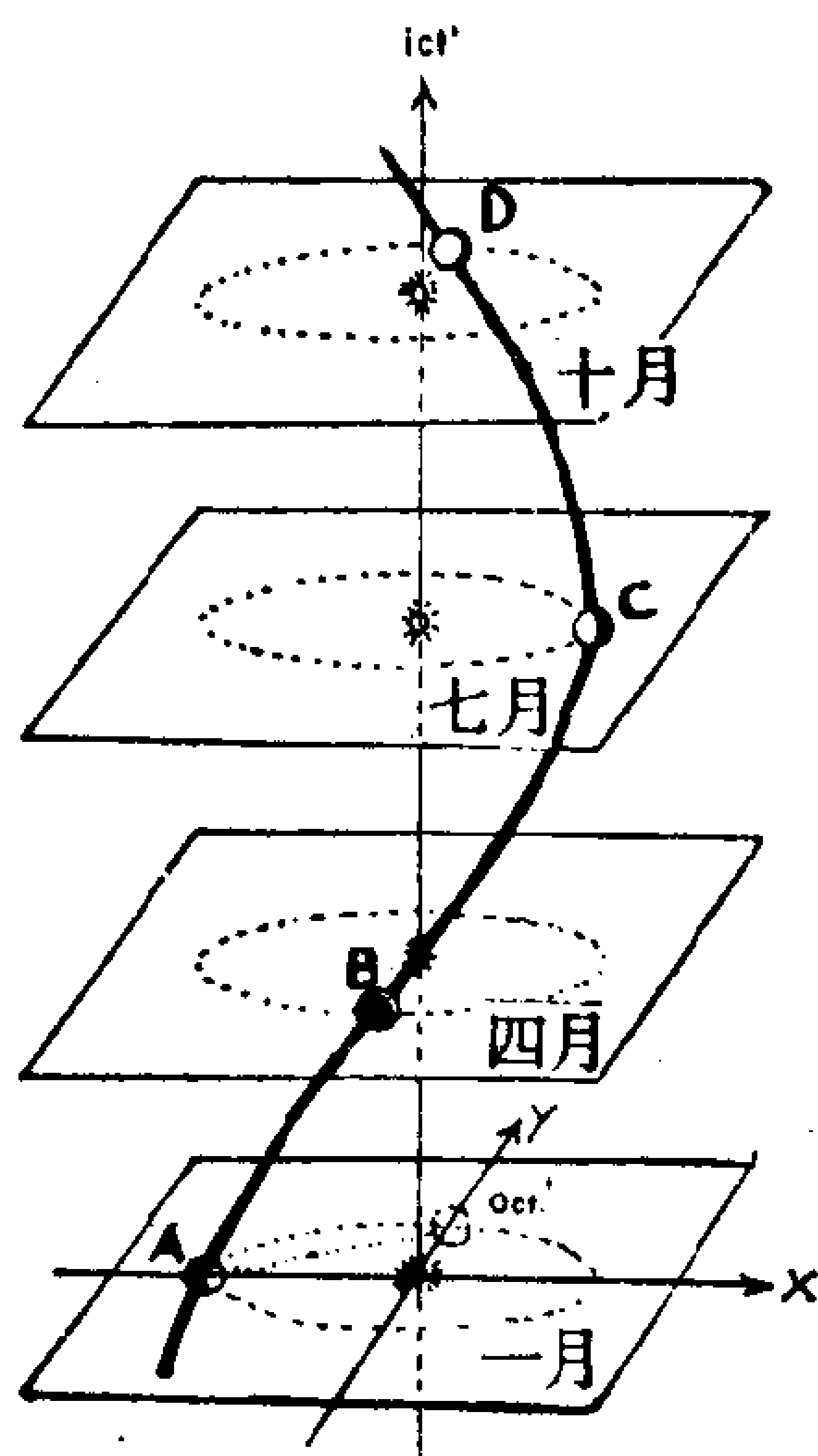


图 VI-16 在 x, y, ict 座标系中画出的地球绕日运动时的世界线。一月份和十月份地球位置之间的时空距离是最短的距离。但一月份的位置与十月份的位置在一月份平面上的投影（oct'）之间的距离，当然不是最短的距离。

测结果之间存在着差异，差值是每个世纪43角秒，当时无法解释。爱因斯坦的相对论性引力理论填补了这个空白，成为超过旧的牛顿理论的无可争辩的胜利者。

统一场论

爱因斯坦的毕生工作可以归结为把大部分物理学几何化：时间变成了三个空间座标的合法的第四个伙伴（除 i 这个因子之外），引力被解释为这个四维世界弯曲的表现。但是电力和磁力仍然留在这块几何征服地之外，在取得这样大的进展后，爱因斯坦花费了全部的精力想给这顽固的电磁场也套上一个坚固的几何笼头。四维空间还有什么几何性质至今没有被发现而能解释电磁相互作用呢？爱因斯坦本人和许多其它“感兴趣的局外人”，象著名的德国数学家韦尔等人，都尽力想给电磁场作出纯几何的解释。但是电磁场这个麦克斯韦的产儿，由于典型的苏格兰人的顽固性，却拒绝被几何化。爱因斯坦在他于1955年去世之前的大约四十年间，一直在研究所谓“统一场论”，这就是说，它能把引力场和电磁场在单纯的几何基础上统一起来。但是随着时光的流逝，这项工作变得越来越没有希望。爱因斯坦不时地提出一些新的公式，宣称它们一定能解决统一场论之谜，这些复杂的张量公式曾被印在了“纽约时报”和世界各地其它报纸的头版上。但结果这些公式总是不能胜任，于是又重新陷入沉寂，等待下一次的新发现到来。不论是老的还是年轻的理论物理学家，对于能否给电磁场作出纯几何的解释都逐渐丧失了信心。若能做到这点当然再好没有，但是自然界不可能被迫去做违反它本性的事。另一方面，物理学家在新发现的场方面取得了长足的进展，除了经典的引力场和电磁场之外，波动力学所引入的新的场已在科学上取得了牢固的地位。

如果对电磁场能作出纯几何的解释，我们就得再去征服介子场、超子场以及许多其它新的场。这样我们才能够说：物理学无非是几何学。爱因斯坦后来对他这个课题越来越感到棘手，也越来越不愿意与别的物理学家讨论这些问题。三十年代初他在英国的一次访问期间，曾到北英格兰一所女子学校里去演讲统一场论的问题(学校把那块写满了复杂的张量公式的黑板珍藏了起来作为纪念)，却拒绝到剑桥大学讲话。他的注意力后来越来越多地被犹太复国主义和世界和平的问题所占据，但他在科学上仍然一如既往，活跃而敏锐。本书作者在第二次世界大战期间常去普林斯顿到爱因斯坦安静的家里访问他，发现他总是象往时一样令人倾倒。作者至今还记得他关于现代物理各个部分的那些知识渊博而又有趣的谈话。爱因斯坦的书桌上到处放着一篇篇的论文，上面写满了复杂的张量公式，显然都是关于统一场论的，但是爱因斯坦从来都不谈到它们。现在他当然已经进入了天堂，一定知道他想把所有的物理学都几何化的企图是对还是错了*。

* 译注：1967年，年轻的美国科学家温伯格和巴基斯坦物理学家萨拉姆在美国物理学家格拉肖首先提出的理论基础上，分别提出了弱电统一的规范理论，即温伯格-萨拉姆模型。近来，特别是近两年来的一系列新的实验，越来越证明温-萨模型是正确的。温-萨模型是建立自然界四种力相统一的统一场论的第一步，格拉肖、温伯格和萨拉姆三人因为在弱电统一理论上的贡献，荣获1979年诺贝尔物理学奖金。

第七章 量子定律

人人都知道,原子(它在希腊文中意味着“不可分的”)是大约23个世纪以前在雅典生活并从事教育的狄谟克瑞特头脑里的产物。他认为,不能想象物体可以无限地被分割为越来越小的部分,因此假定必然存在着终极的粒子,它们是如此之小,以致不可能再把它们分为更小的部分。狄谟克瑞特认为有四种原子,即石原子、水原子、气原子和火原子,并相信所有各种各样的已知物质都是这四种元素不同组合的结果。他的观点在十九世纪初为英国化学家道尔顿所采纳,并给它提供了可靠的实验根据,从而成为整个现代化学的基础,尽管我们现在知道原子根本不是不可分的,而且事实上有着相当复杂的内部结构。但是,狄谟克瑞特关于终极基元的观念现在已经转到更小得多的粒子上,这些粒子形成了原子的内部结构。也许有人希望电子、质子以及其它所谓的“基本粒子”乃是真正确实不可分的,基本的,完全具有过去狄谟克瑞特使用这个词的意义。这种想法也许是因为我们不熟悉后来所发现的这些粒子,我们可能在这里也犯了十九世纪的物理学和化学家所犯的同样错误,他们曾以为物质的可分性就到原子为止。当然,也可能发生这样的情况:如果将来发现今天的基本粒子也具有复杂的结构,并给它们的组成部分想出一些新的名称,那就证明这条道路没有个完结,若干年后又会迈出下一步,到达更小的粒子。我们无法预言未来的科学发展,狄谟克瑞特原来关于不可分性的哲学概念究竟是对还是错,也没办法用经验方法予以回答。但是许多科学家,

包括作者在内，不知什么缘故总是比较满足于一种想法，认为在研究物质时"事情总得有个尽头"，将来的物理学家一定知道有关物质内部结构的所要知道的全部东西。而现代物理学的基本粒子，似乎也完全有应理由该百分之百地这样称呼它们，因为它们的性质和行为似乎要比我们以前对原子所了解的多。

破开旧原子

19世纪末，物理学家们把注意力转到了电荷通过气体的问题。几个世纪以来人们已经知道，气体通常是相当好的电绝缘体，但有时在很高电压下，它们可能被击穿。放电的强度甚为悬殊，从穿着胶鞋的人在铺着地毯的地板走路时，他的手与门把之间产生的细小的火花，乃至雷击时产生的强大闪电。但是，克鲁克斯爵士（他对科学的贡献，由于他相信唯心论和超自然力而略显逊色）曾指出，当气体压强减小到比一个大气压小很多时，电荷就能很顺利地通过气体。克鲁克斯管可以放出色调单纯的光，其颜色与气体的种类有关，它们至今仍在城市的街道上大放光明，给旅馆、夜总会以及许多其它东西作广告。当管中气压足够低并在管子上加上高电压时，管中就出现一束明锐确定的射线从阴极射向阳极，如果有一位爱开玩笑的物理学家把阳极从射线的路径上移开，它就会打到管子远端。从阴极板发出的这种神秘的射线打到玻璃壁上时，会使它放出弥散的绿光，放在它的路径上的任何物体都会投出完全确定的阴影。克鲁克斯曾把一块磁铁放在管子附近，看到这束射线发生了偏转，就象是有电流或从阴极飞出了一群带负电的粒子那样的情况。差不多在同时，法国的皮林发现了，放在这种射线路径上的金属板得到的是负电荷。这一切似乎都表明，这种射线一定是在稀薄气体中飞过的带负电的粒子，这种情况很象是在

电解过程中通过液体运动的法拉第离子。当然，两者有着本质的差别：在电解过程中，离子必须使劲开路，慢慢地挤过密集的液体分子，决不会走错了路到达相反的电极，而稀薄气体中的阴极射线（后来这样称呼这种射线）则是直线飞向前，能击中它们途中遇到的任何东西。

这些看法遭到了德国物理学家林纳德的反对。他曾发现，阴极射线可以很容易地通过放在它们路径上的各种屏障，而不会给屏上穿出空洞，但任何物质粒子都肯定会在上面打出洞的。林纳德论证了，只有对于波而不是一束物质粒子，才能是这种情况。当然，我们现在知道，为了防止中子逸出以致引起核电站的工作人员患放射病，在原子反应堆的周围必须筑起很厚的混凝土墙，因此，林纳德的论点听起来就不那么有力了。但在它提出来的当时，却是一个非常有力的论点。



图 VII-1　卢瑟福勋爵和汤姆逊爵士

为了解决实验矛盾，证明阴极射线乃是粒子流，并查明这些粒子的物理性质，英国的科学促进会最高委员会把这项任务交给了J·J·汤姆逊，即后来的约瑟夫爵士（图VII-1，右）。他是一位生于曼彻斯特的物理学家，当时40岁，是剑桥著名的卡文迪希实验室的领导人，该实验室是当代物理学主要的中心之一。汤姆逊假设阴极射线乃是由快速飞过的粒子所组成，并决定去测量它们的质

量和电荷。有关这些量的知识来源之一，就是观测到了阴极射线在磁场中偏转（图VII-2 b）。这一偏转不仅与飞过粒子的电荷和质量有关，而且也与它们的速度有关，测出这一偏转只能求出乘积 $\frac{\text{质量}\times\text{速度}}{\text{电荷}}$，用通常的记号表示就是 $\frac{mv}{e}$。但由理论可以推知，电场引起的偏转与这两个量的另一种组合形式有关，即与乘积 $\frac{mv^2}{e}$ 有关。这样，测出这两种偏折并将所得结果给合起来，汤姆逊就分别求出了它们的速度 v 以及电荷质量比 $\frac{e}{m}$。虽然速度 v 与加在管子上的电压有关，但 $\frac{e}{m}$ 总是保持不变，它等于 $5.28\times10^{17}\ \frac{\text{esu}^*}{\text{gr}}$。

尽管几乎可以肯定，e 的数值一定与法拉第在其用液体做的电解实验中所发现的基本电荷的数值相同，但汤姆逊还是做了一个特殊的实验，在气体离子的情况下来测量这一数值。他的方法是根据另一位卡文迪希的物理学家 C. T. R. 威尔逊的发现（古老的剑桥有一首歌中唱道："C. T. R. 是一颗光辉灿烂的星！"），威尔逊曾发现，与水蒸汽达到饱和的无尘的空气若是由于膨胀而突然被冷却，则在空气中可能存在的离子上就要形成细微的水滴。** 如果膨胀不大（低于 30%），只有负离子可以作为形成水滴的凝聚中心，但如膨胀很大，水蒸气就会同时在正、负离子上凝聚。汤姆逊的实验装置大致如图 VII-2(c)所示。它由一个玻璃筒 C 和一个活塞 P 以及一只金属圆盘 D 所组成，圆盘 D 与一验电器相联接。通过管子 T，圆筒充满了潮湿的空气，并使它受到 x 射线的照射。当活塞突然被提向上，就造成空气的膨胀（小于 30%），在筒内的

---

* esu 是第五章中讲过的静电单位，gr 是质量的单位。

** 如果空气中含有尘埃，饱和蒸汽首先要在尘粒上产生，因而干扰实验。

负离子上由于凝结了水而形成了一片云雾。水滴缓慢地降落到圆盘 D 上，形成水滴的离子的总电量可由验电器测出。若知道筒中原来水蒸气的数量和雾滴的平均大小，我们就能求出形成的雾滴总数，换句话说，就可以求出离子的总数。因为雾滴小得无法看到，汤姆逊就决定根据云雾向圆盘降落的速度来求它们的大小。雾滴越小，它降落就越慢，有一个现成的公式可以决定下降的速度、雾滴的半径与空气的粘滞性之间的关系，它首先是由斯托克斯导出的。利用这个方法，汤姆逊将验电器所收到的总电量除以雾滴总数，就求出了每个雾滴的电荷数值是 4.77×10^{-10} esu，即与电解液情况下的数值相同。

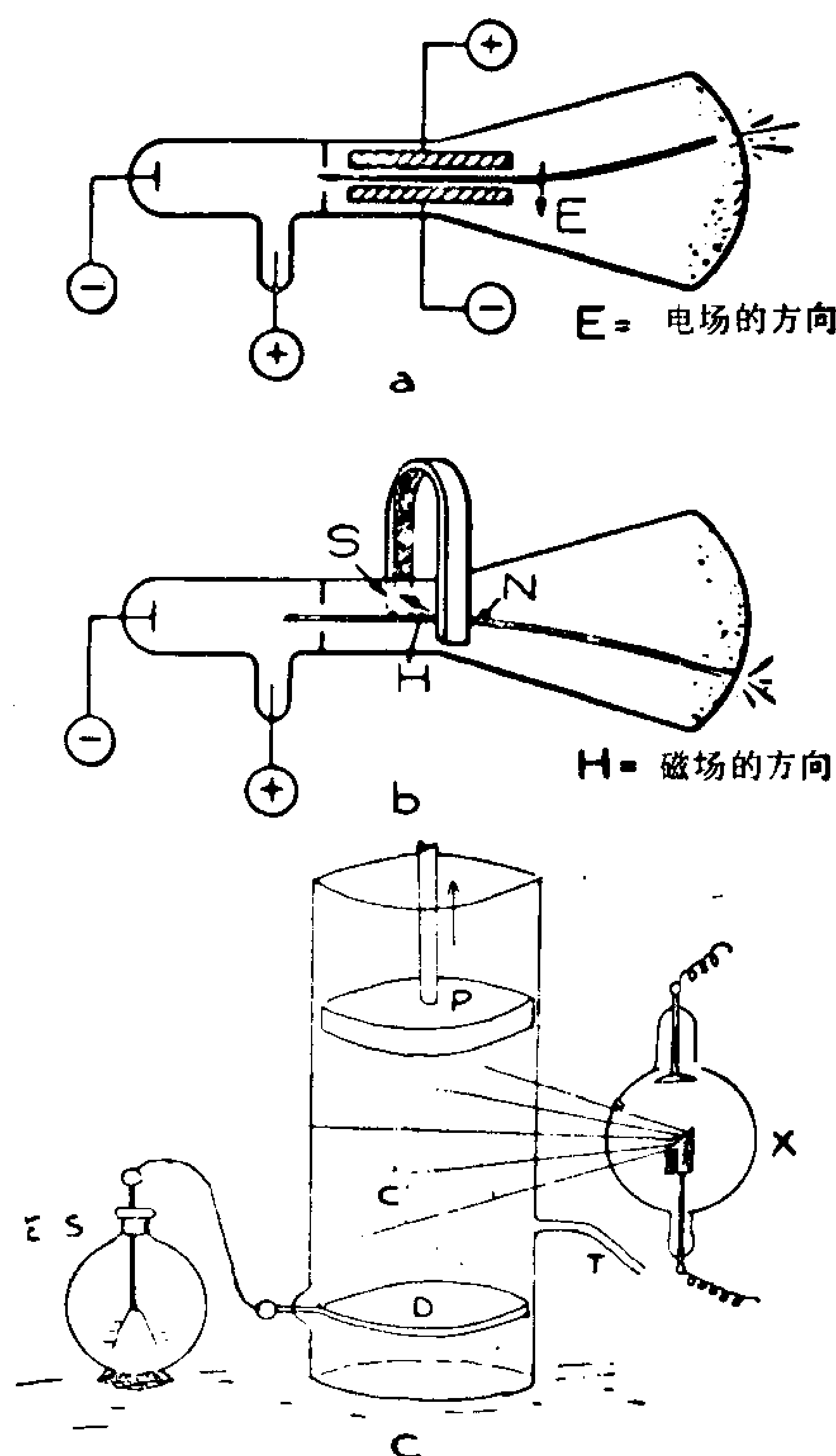


图 VII-2　J·J·汤姆逊测量电子质量的方法。(a) 由电场中的偏转可以测出 $\frac{mv^2}{e}$。(b) 由磁场中的偏转可以测出 $\frac{mv}{e}$。把这两个结果结合起来就可求出 $\frac{m}{e}$。(c) 由气体离子上形成的水滴的下降速度，可以测出 e，知道 $\frac{e}{m}$ 和 e 以后，m 就容易求出。

现在，汤姆逊就可以根据早先测出的荷质比 $\frac{e}{m}$ 来求 m 的数值

了，结果证明它等于0.9×10^{-29}克，即比氢原子的质量小1840倍。

这就有了一个伟大的发现：有一种粒子，它比所有原子中最轻的原子几乎还要轻两千倍！汤姆逊得出结论说，法拉第的离子是带有电荷的原子，而构成阴极射线的粒子正是自由的电荷本身，并给它们起了个名字叫做**电子**。把原子具体设想为一个带正电的、有重量的球，有许多细小的电子分布在它的体内，就象西瓜瓤里的瓜子一样。这就是人们所说的“静模型”，即想象原子中的电子是静止在一定的平衡位置上，这一位置由带负电的电子之间的静电斥力与电子和带正电的原子中心之间的静电吸引力的平衡来确定。当原子受激，即从外界得到一定的过剩能量时，就假定它内部的电子在其平衡位置附近振动，同时发出各种不同波长的电磁波（光波）。人们曾做过许多艰苦的计算，企图校正不同电子组态的振动频率，以符合观察到的各种化学元素的光谱线，但是这项工作徒劳无效，直到卢瑟福的原子模型发表之后，问题才得到解决。

神秘的*X*射线

十九世纪末有许多重要的发现，很快使物理学从“经典的”形式转到了“现代的”形式。这些发现都是偶然得出的，但是，这些发现总是吸引了思想敏锐的科学家，他们十分注意地观察那些不寻常的事件，锲而不舍地进行研究，直到真相大白。1895年十一月十日，德国物理学家伦琴（图VII-3）用克鲁克斯管中的阴极射线做了一些实验，注意到偶然放在附近桌子上的萤光屏在管中通有电流时发出了亮光。伦琴用一张黑纸盖住了管子，但是亮光仍不消失。而用一片金属片挡住管子时，这个效应就完全被止住了。因此，这是一种新的辐射，它是管中发出的，而且容易穿过对于普通

的光并不透明的物质。伦琴把这种新发现的辐射称为 X 射线，他用这种辐射拍下的第一张照片是他妻子的手，照片清晰地显示出了手的骨骼结构和她的结婚戒指。进一步的研究指出，这种有贯穿能力的辐射是由于阴极射线束轰击玻璃管的另一端，而从该端发出的。若在阴极射线的路径上放一块称为"对阴极"的重金属板，就可大大增加 X 射线的强度（图 VII-3）。发射 X 射线的原因是阴极射线中快速运动的电子(读者注意，电子在两年后才被汤姆逊爵士发现的）与放在它们途中的靶子发生碰撞。由于电子的运动突然受阻，它们就以波长很短的电磁波形式放出其动能，就象子弹击中装甲后发出声波那样。而且，和子弹的情况一样；子弹发出的声音中包含一切可能的频率，即是所谓"噪声"，而不是纯音，X 射线也是连续变化的波长的混合。德国人把它们称为"Bremsstrahlung"（"Bremse"意为煞车，"Strahlug"意为辐射)，和其它许多德国名词一样，这个名词在英语中也是常用的，称为轫致辐射。(实际上，要是说"煞车辐射"听起来就会觉得奇怪了！)



图 VII-3　马克斯·冯·劳埃(左边)与威尔海姆·伦琴

因为 X 射线在磁场中不发生偏转，所以伦琴从一开始就假设它们是类似于普通光的振动。如果这样的话，它们就应当能显示衍射现象，伦琴花了几年的时间想从实验上证明这一点，但是没有取得任何肯定的结果。在他这伟大发现之后十二年，一位年轻的

理论物理学家冯·劳埃（当时三十三岁）去访问伦琴（伦琴当时是慕尼黑大学的实验物理学教授，而劳埃也在这所大学），请他审查刚刚由自己的助手弗里德里克和尼普平拍出的几张照片。伦琴一眼就看出这正是几年来所要找到的东西：X 射线穿过晶体时产生

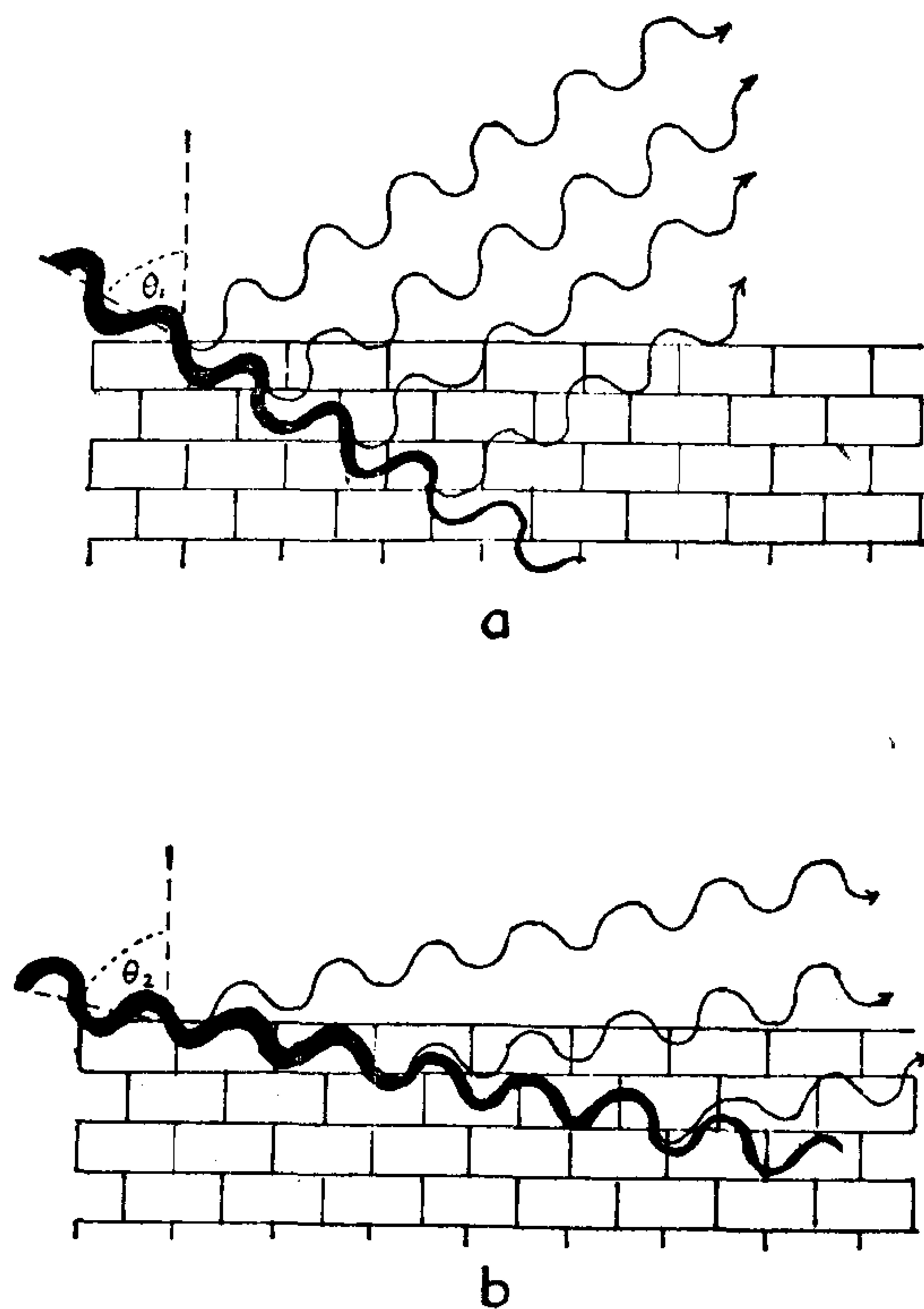


图 VII-4　X 射线或德布洛意波在晶体表面上的反射。在(a)中，顺序在一层层晶体点阵(用砖形格子表示)上反射出来的子波相位相反，因而互相抵消。在(b)中这些子波的相位相同，结果强度增大。

的漂亮的衍射图样(照片IV，上)。冯·劳埃利用晶体作为衍射光栅的想法，是根据纯理论的考虑得出的。因为利用普通的光栅既

然不能使X射线显示任何衍射现象，这说明它们的波长一定是很短的。而晶格是由一层层大约相隔10^{-8}厘米的原子或分子有规则地排列而成的，当一束X射线照射到晶体表面上时，它便深深穿入晶体，而在它经过的每一层上部分地被反射(图VII-4)。如果入射角刚好使得各反射子波的相位相同，反射束的强度将增大。若是另一入射角(a)，反射子波的相位相反，预料就会得到暗点。和普通光栅的情况一样，衍射图案既可在反射束中也可在透射束中观测到。但现在的情况比较复杂，因为晶体是大量平行的分子层所组成的系统，所以预期的衍射图案看起来比普通光的情况更复杂。照片IV中上一张是在贝尔电话实验室照摄的，照的是X射线在镍-铁合金上的衍射。

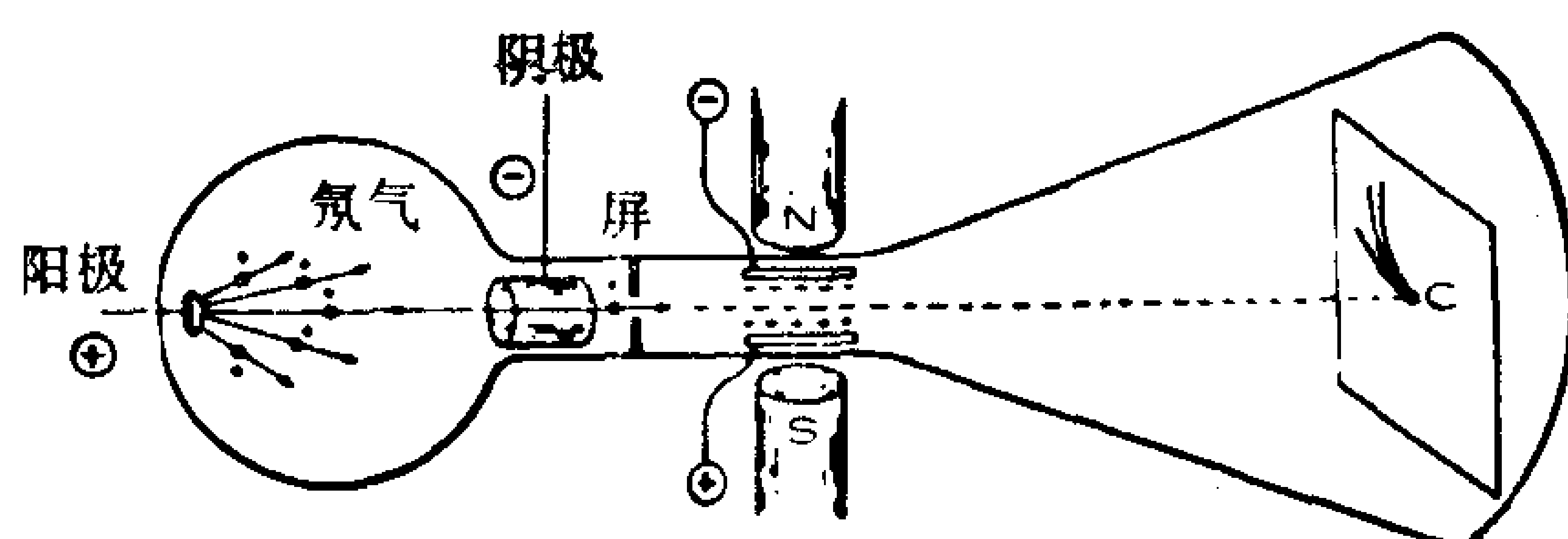
后来发现，除了连续的"轫致辐射"之外，X射线中还包含有一系列明锐的谱线，与光学谱线十分相似，它们是由原子内部深处电子的跃迁引起的。布拉格父子曾对X射线线状光谱做了大量的工作，并系统提出了X射线光谱学的精密方法。

同　位　素

十九世纪初，英国化学家普劳特注意到这样一个事实：各种元素的原子量若用氢的原子量来表示，都很接近为整数。这个观测事实使他提出一个假说，认为不同化学元素的原子无非都是不同数目的氢原子的集合：氦＝4个氢；碳＝12个氢；氧＝16个氢，等等。普劳特的同时代人没有接受他的观点，并且很快就指出了一些和他这个大胆的假说有矛盾的事实。例如，氯和镉的原子量被发现分别是等于35.457和112.41，它们正好是两个整数之间大约一半的数值。此外，对于原子量接近为整数的元素，如果认为原子是由氢原子集合而成的话，它们原子量的数值也总是比预期

的要小些。因为氢的原子量等于1.0080*，氦的原子量就应当等于$4\times1.0080=4.0320$，而它实际上是4.003，即小了0.8%。同样，十二个氢原子集合在一起应当重$12\times1.0080=12.096$，而化学上估计碳的原子量只有12.010。由于这些"明显的"矛盾，普劳特的假说就被否定了，几乎被人们遗忘了半世纪之久，直到1907年，由于J·J·汤姆逊的研究结果才使它获得了新生。

在确定了电子的存在并通过电子束在电磁场中的偏转而测出了电子的质量和电荷之后，汤姆逊就转而注意在放电管中沿着相反方向运动的粒子。这些带正电的粒子流称为"极隧射线"，因为它们最早是由于在阴极板上钻出一些孔(隧道)而被观测到的，这些孔能让粒子通过，进入阴极后面的空间。汤姆逊研究"极隧射线"所用的设备如图VII-5所示，其原理与他研究电子流的时候所



图VII-5 汤姆逊研究极隧射线的装置。从阳极向阴极运动的正离子能通过在阴极上开出的一些沟道，经过一个屏之后进入一电场和磁场区，电场和磁场的取向相同。因为磁偏转(在水平方向)依赖于粒子的速度，而电偏转(在垂直方向)依赖于粒子速度的平方，所以质量相同但运动速度不同的粒子，在屏C上将沿着一条抛物线散开。

依据的相同。在阳极和阴极之间由于气体放电而产生的带正电的粒子，穿过在阴极上钻开的小孔(隧道)，进入取向相同的电场和磁场区。电场引起的粒子束在垂直方向的偏转与$\frac{m}{e}v^2$成比例，而磁

* 化学家是把原子量调整到使得碳的原子量等于12.00。

场引起的水平方向的偏转与$\frac{m}{e}v$成比例。因此，对于荷质比相同而速度不同的粒子，其垂直偏转正比于水平偏转的平方，因而在萤光屏 S 上观测到的曲线应是抛物线。

汤姆逊观测到的情况正是如此，但他不止看到了一条抛物线（对于任一给定的化学元素），而是有两条或更多条，这表明存在着质量不同的原子。例如对于氯，得到了一条质量为 34.98 的氯原子抛物线，还有另一条质量为 36.98 的氯原子抛物线，两个数字都很接近为整数。后来把同一种元素而原子量不同的原子定名为"同位素"，它们在门捷列夫周期表中占据同一位置。以后发现这两种重量不同的氯原子的相对数量（根据照相底片上的黑度估计而来）分别是 75.4% 和 24.6%。因此，平均原子重应为 $34.98\times0.754+36.98\times0.246=35.457$，与化学上估计的氯原子量正好一致。阿斯顿进一步的研究表明，这对其它化学元素也同样是正确的。例如镉共有八种不同的原子，其原子量分别是 106，108，110，111，112，113，114 和 116，它们相对的数量是 1.4%，1%，12.8%，13.0%，24.2%，12.3%，28.0% 和 7.3%。平均原子量是 112.41，与化学测量的结果完全相符。这样，普劳斯过去的观念又变为真知卓见了。

但即使发现了同位素，后来发现还是有些差异，例如氯的两种同位素精确的原子量是 34.98 和 36.98，而不是 35.280 ($=35\times1.008$) 和 37.296 ($=37\times1.008$)。但这次不是坏事，而是好事，因为根据爱因斯坦质能等价定律，若干粒子结合后的重量应当比它们原来的重量小些，所小的数量等于它们之间的结合能除以 c^2。因此，复合原子的质量与其各个组成部分加起来的质量之差，可以告诉我们在原子形成过程中放出的能量。假如碳原子 $_6C^{12}$，它共有六个质子和六个中子。氢原子（即质子）的精确质

量是 1.008131，而中子的质量是 1.008945。因此总的质量应是 $6\times1.008131+6\times1.008945=12.102456$。但精确测量的结果给出碳原子的质量数值是 12.003882，即小了 0.098546 个单位。这一所谓的“质量耗损”就是质子和中子在形成碳原子核的过程中放出的能量所相当的质量。根据爱因斯坦公式，它相当的能量是 $0.0986\times1.66\times10^{-24}\times9\times10^{20}=1.48\times10^{-4}$尔格或 92.5 兆电子伏特*。

卢瑟福的原子模型

E·卢瑟福 1871 年生于新西兰南岛的尼尔森市附近，多年后，由于他在科学上的功绩，被授予英国爵位，成为尼尔森的卢瑟福爵士。他在 24 岁时来到剑桥，在卡文迪希实验室汤姆逊手下学习，毕业后他在蒙特利尔获得了麦克吉尔大学的教授职位，在那里他对新发现的放射性现象作出了首次重要的贡献。后来他又转到曼彻斯特大学，1919 年汤姆逊退休之后，他成了卡文迪希实验室的领导人。同事中都把他叫做“鳄鱼”，这是他的得意门生之一、俄国物理学家卡皮查给他起的浑名。必须指出，尽管英国人常到（确切地说是过去常到）埃及去，曾有人被鳄鱼咬伤过或吃掉，这个外号对英国人来说听起来是颇为有损名誉的，但是俄国人从来没有在自己的国家见到过鳄鱼，它只是强权的象征。虽然谁也不敢当着他的面叫这个浑名，但卢瑟福是知道的，并暗自引以为荣，在为卡皮查关于极强磁场的研究新建的建筑物的墙上，由于从来没有公开过的原因，刻了一幅大型的鳄鱼浮雕。

作者回忆在卡文迪希生活的那些日子时，想起了在剑桥发生的一件与“鳄鱼”有关的小事……

* 1.66×10^{-24} 是氧原子质量的 1/16。

这位热情豪爽的英国爵士，
就是大名鼎鼎的卢瑟福。
出身于新西兰的农夫之家，
身上的气质依然来自乡土，
他雷鸣般的声音和快活的大笑，
连最厚的大门也关不住。
但是他要生起气来，
你得老老实实地听他讲述，
他用的是世上最生动的语言，
任何人都能明白清楚！

有一天乔治·伽莫夫去做客，
请他去的是主人卢瑟福。
为了欢迎玻尔他在举行茶会，
（关于玻尔的情况你们可能都很清楚。）
男士们在玩高尔夫和板球戏，
太太们则依然如故，
大谈其衬衫，披肩和饰物——
这一切玻尔感到越来越厌倦，
走去叫来了伽莫夫，
"我看见下边放着你的摩托，
你能否领我看看它的功效何如？
来，让我们走吧！
这个集会毫无引人之处！"

于是玻尔走向摩托车，
跟在后面急急快跑的是伽莫夫，
伽莫夫给他解释车子的功效，
玻尔却已跨上座位加快了车速，
车子沿着贝克街飞驰，
严重威胁着行人和牲畜。

虽然一开始他就把马力开足，
但他没能在车上长久坐住，
车子还没开出五十码，
就弄坏了那神经质的发动机组。
他想停下来车子却在乱转，
中断了上下交通，阻塞了皇后大路。

当伽莫夫奔上前来帮忙把车停止，
对玻尔真象是从天而降的佛祖。
但是卢瑟福在伽莫夫耳边怒吼：
"伽莫夫！
你要是再敢把这种破车给玻尔，
扰乱交通造成事故，
我发誓要拧断你的脖子，
让你血流如注！"

但是，让我们还是回到卢瑟福在曼彻斯特的那些岁月吧。卢瑟福不喜欢汤姆逊那种西瓜式的原子模型，决定用一种新的粒子当炮弹来轰击原子，以探索原子的内部结构，在发现放射性之后物理学家已经掌握了这类新粒子。卢瑟福早年在麦克吉尔时就已知道，由各种放射性元素发射出的所谓α粒子，实际上乃是从不稳定的原子发射出来的具有极高能量的带正电的氦离子束。α粒子在与原子的带电部分发生相互作用时，一定要偏离其原来的路径，由此产生的α粒子的散射，应能揭示出原子内部电荷分布的情况。因此，卢瑟福让α粒子流射到不同的金属薄片上（图 VII-6），并对穿过薄片后向不同方向散射的α粒子的数目进行计数。当时，粒子计数是一件很辛苦的工作。虽则在今天物理学家可以安装一部自动的盖格计数器，然后自己去散步或看电影，但卢瑟福当时只能通过显微镜用眼睛注视着放在α粒子路径上的萤光屏，扳着

手指计算闪烁次数，即数出高能粒子击中萤光屏时产生的闪光次数。那时有些核物理学家甚至要吃药（莨菪制剂）来扩大他们眼睛的瞳孔以利观察。作为这些研究工作的结果，卢瑟福发现 α 粒子穿过金属薄片后的散射是相当显著的。虽然入射束中多数粒子仍保持其原来的运动方向，但也有不少粒子偏转了很大角度，有些甚至实际上被撞回了。这个结果与汤姆逊模型的预言完全不符，按照汤姆逊模型，原子的质量和正电荷几乎是均匀地分布在整个原子中。事实上，在这情况下，入射粒子的电荷与原子内部的电荷之间的相互作用绝不会强到能使 α 粒子离开其原来的运动方向发生大角度的偏折，更不用说能把它撞回去了。唯一可能的解释是原子的质量和电荷都集中在一个很小的区域里，实际上是集中在一点，即原子的中心（图 VII-7）。为了看出这一假设是否符合观察到的散射结果，必须根据力学定律导出一个公式，能算出 α 粒子在离排斥中心不同的距离处通过时偏转的大小。和许多伟大的实验家一样，卢瑟福不喜欢数学，据传说这个公式是由一位年轻的数学家福勒帮他导出的，后来福勒与卢瑟福的女儿

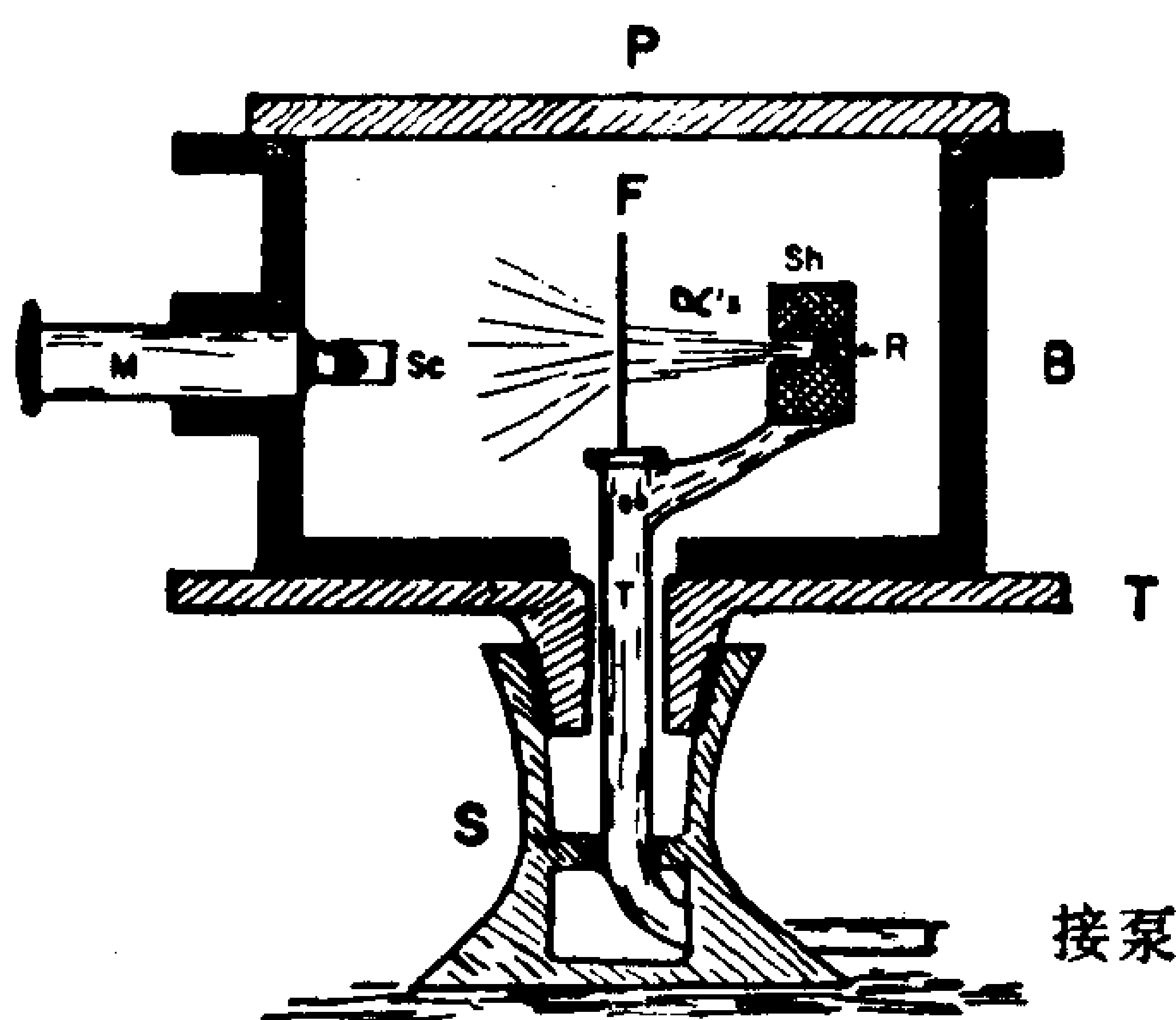


图 VII-6　研究 α 射线散射的最早的装置。在抽空的盒子 B 上面放一块可移动的板 P，盒子放在一张可转动的桌上 T 上。放射源 R 放在铅制的屏蔽罩 Sh 里，散射片 F 与基座固定相连。装有闪烁屏 Sc 的显微镜则与盒子相连，可以绕水平方向转动。

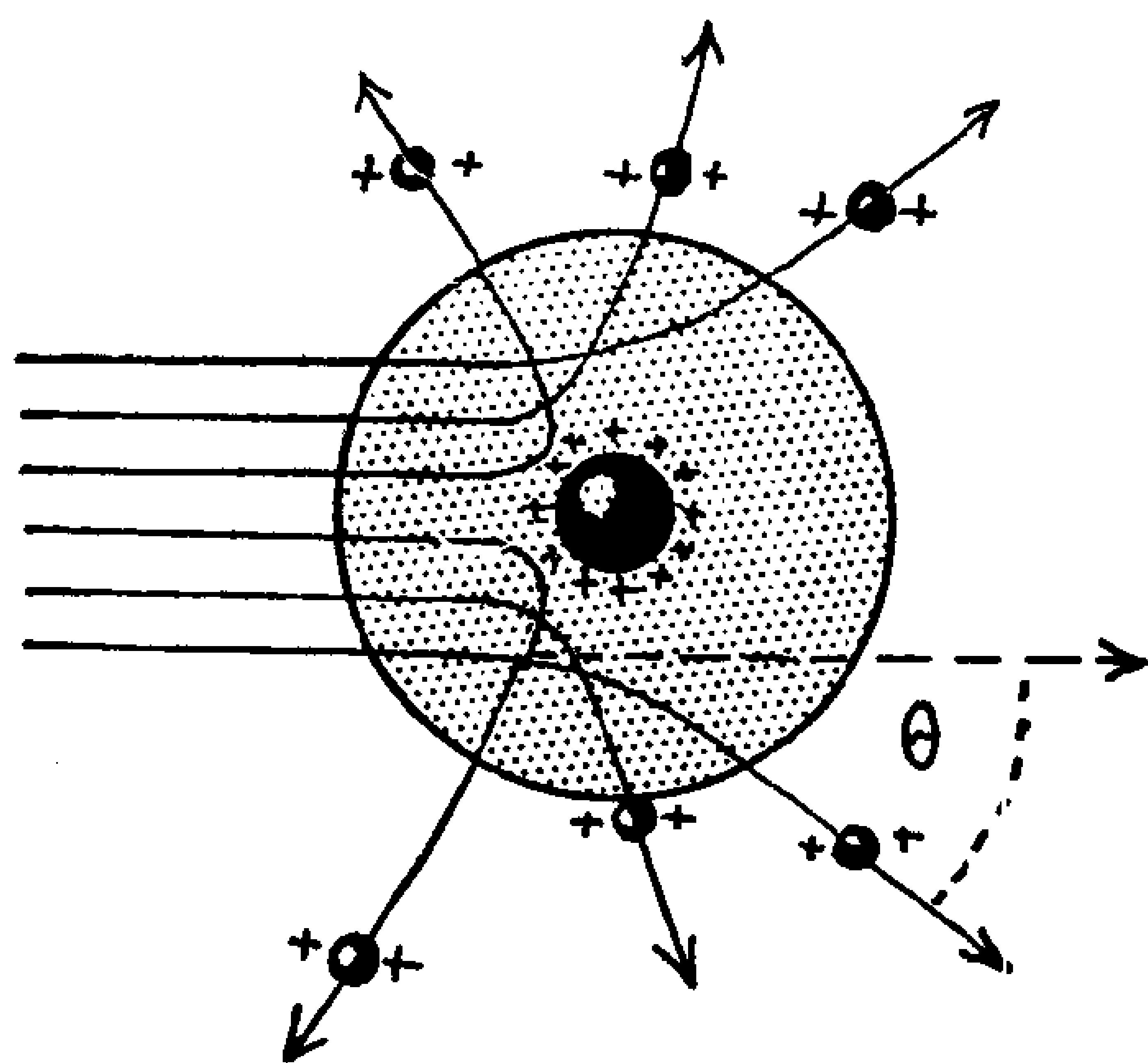


图 VII-7 原子的核模型。

结了婚。根据卢瑟福公式，偏离原来运动方向角 θ 和 α 粒子数应当与 $\sin\frac{\theta}{2}$ 的四次方成反比，这个结论与观察到的散射曲线非常相符。这就得出了一个全新的原子图象，即原子有一个小而重的带电的核心，卢瑟福把它称为原子核，在它的周围是一群在库仑吸力作用下转动的电子。它看起来就有点象行星绕着太阳转动并在牛顿万有引力作用下维持其轨道不变的系统。后来卢瑟福的学生盖格和马斯登的工作确定了，原子核的正电荷亦即围绕它转动的电子数，等于该元素在门捷列夫元素周期表中的排位数或原子序数。原子结构的现代模型就这样问世了。

紫外线的灾难

我们现在要回顾一下十九世纪最后十年的历史，当时物理学正在经历着从经典幼虫变到现代蝴蝶的痛苦。当时，热的分子运动论已由于玻尔兹曼、麦克斯韦等人的工作得了充分发展，我们所说的"热"是构成一切物体的无数分子无规运动的结果已是毫无疑问的了。在分子通过空间自由运动的最简单的、即气体的情况下，人们根据速度分布、分子间的碰撞次数和热现象的其它分子特性导出了一些简单的数学公式。在这一阶段，一位有名的物理学家、天

文学家和通俗读物的作者琼斯爵士想应用统计方法来解决热辐射的问题，统计方法在研究分子热运动时已被证明是很成功的。我们在第四章曾看到，灼热物体会发射的连续光谱，包含所有波长和频率的振动。我们也看到，在每一给定的温度下，有效能量在不同波长之间有着一定的分布，而且能量的最大值所对应的波长随着温度的变化而变化(图 IV-13)。琼斯想知道在辐射的情况下，能量在不同波长之间的分布是否也和气体分子间的能量分布一样遵从同样的统计规律。让我们考虑一下所谓的"琼斯立方体"，它是一个用"理想镜面"镶成的匣子，理想镜面就是落到上面的光要100%地被反射。当然，实际的镜子在反射时总要吸收一些入射光，但我们这里说的是"思想实验"，就象相对论性引力理论中爱因斯坦舱的情况一样。有了这个"琼斯立方体"，并在它的边上装一个小窗和一个光闸，我们就可以打开光闸，让一些灯光照进去，然后再关上光闸把光关在里面。因为光不能被器壁吸收，所以它将遭受无数次的反射，如果一两小时后我们再打开光闸，光就会从容器中冲出来，就象打开轮胎的气门后气体从其中冲出来一样。

在图 VII-8 中，我们对照了两个容器的情况，其中一个充满了处于热运动的分子，另一个充满了各种波长的热辐射。对于第一种情况，分子在空间中以各种可能的速度向所有可能的方向剧烈运动，它们在器壁上被反射，并且在飞行中彼此之间不时发生碰撞。对于第二种情况，是各种波长的光波向所有可能的方向传播，并在镜壁上被反射。

在第二种情形由于没有"波之间的碰撞"，所以它们之间不会有能量的交换。实际上，任何类型的波，不论是海洋里的波浪、声波还是无线电波和光波，都有一个基本性质，就是它们在相遇时互

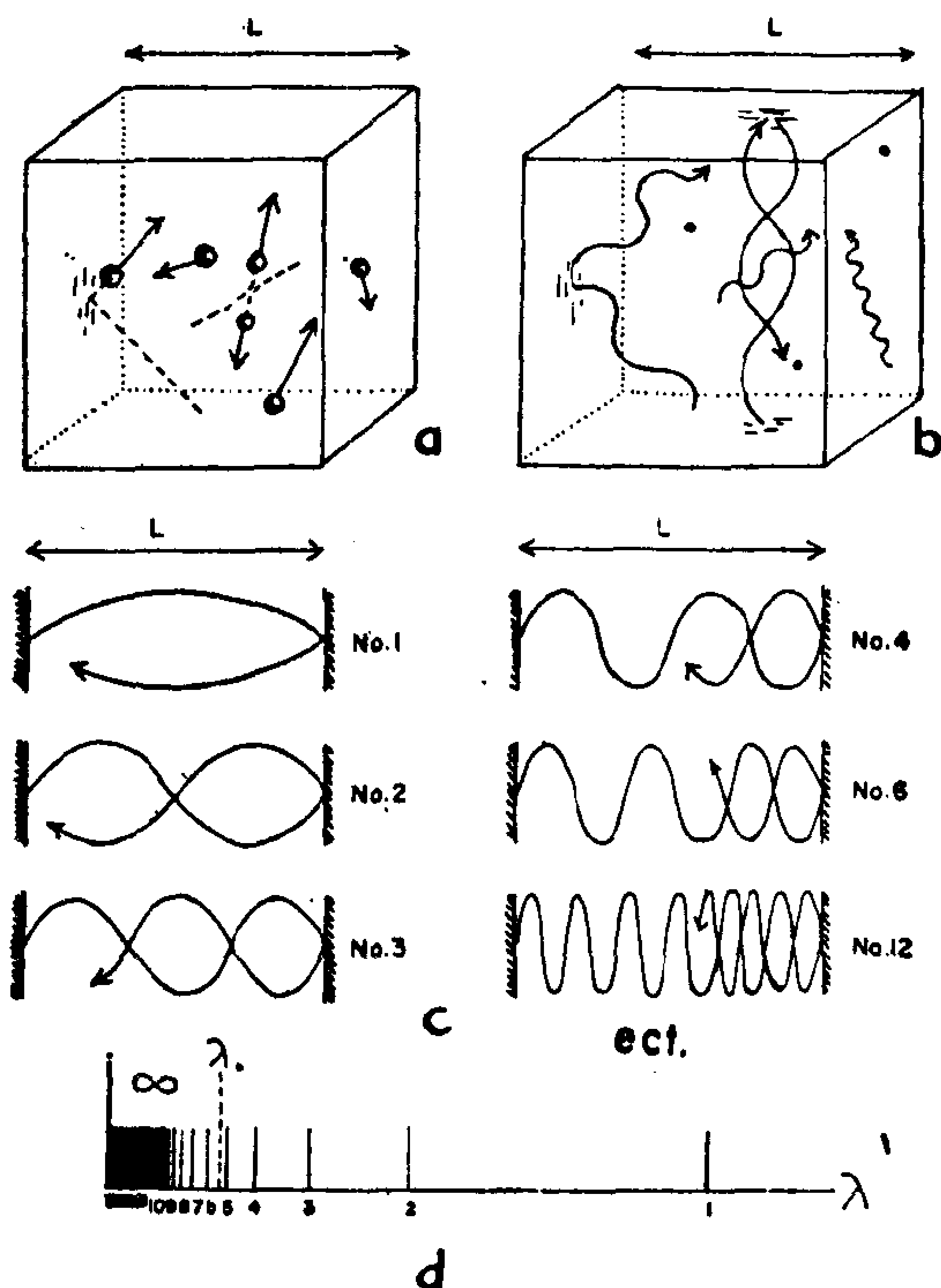


图 VII-8 气体分子在封闭容器中的无规运动(a)与琼斯立方体中波的无规运动(b)之间的比较。(b)中的黑点代表煤屑的微粒，可以使波之间进行能量交换。(c)表示琼斯立方体中各种不同的振动模式(为简单起见只考虑一维情况)，(d)所给出的则是相应的波谱。

不发生影响。两艘并排航行的船激起的船头波，几个人在房间里开会谈话时产生的声波，从同一座城市两个广播电台发出的无线电波，在空中交叉的两束从探照灯发出的光，都是彼此可以通过的，就好象它们是两个善良而古老的中世纪幽灵一样。为了弥补这种在类比时波之间不发生碰撞的情况，让我们想象在“琼斯立方

体”中有少量煤屑微粒，它们可以吸收一种波长的一定能量，把它转给另一种波长。我们用煤屑来比喻，是因为煤屑是黑色的，而大家知道，黑色的物体(或者更确切地说是理想黑体，以与琼斯立方体的理想镜面相适应)会吸收和发射任何波长的辐射。在这个思想实验中引入煤屑，只是为了让不同波长的光振动之间有能量交换。它们能够如此而又不致从系统中取出能量，因为它们非常之小，因而热容量也相应地小。

现在让我们看看有效能量是如何在琼斯立方体中可能存在的各种不同振动之间分布的。统计物理中有一个基本法则，称为“能量均分定律”。这个定律说，如有大量系统(例如单个的气体分子)彼此之间处于统计性质的互相作用中，则有效能量在它们全体之间将是平均分配的。因此，如果容器中共有 N 个气体分子，总的有效能量是 E，每个分子的平均能量便是

$$\varepsilon=\frac{E}{N}$$

这个简单的定律对于琼斯立方体中所能存在的大量的波也一定适用。但是，立方体中可能有多少个波呢？为了简单起见，让我们只考虑在水平方向传播的波，即波只在立方体左右之间传播。从图VII-8c中可以看出，这就象是两端固定的小提琴弦上的情况(读者可与第一章所述毕达哥拉斯的工作做一比较)。最长的可能的波是1号波，其波长等于器壁之间距离 L 的两倍。下一个较短的波是2号波，波长是 L，也就是 $\frac{2L}{2}$。再短的波将是 $\frac{2L}{3}$，$\frac{2L}{4}\left(或\frac{L}{2}\right)$，$\frac{2L}{5}$，$\frac{2L}{6}\left(或\frac{L}{3}\right)$……$\frac{2L}{100}$，$\frac{2L}{101}$……$\frac{2L}{1000000}$……。电磁振动可能有的波长没有下限，如果把这一序列继续下去，我们就会得到可见光、紫外线、X 射线、γ 射线等等。这样，可能的振动数便是无限

大，若把这个论点推广到向所有三个方向传播的波，当然也会得到同样的结果。因此，按照经典的能量均分定律，有效能量不论多大，它在所有可能的波之间均分的结果是

$$\varepsilon=\frac{E}{\infty}=0$$

它的物理意义如下。如果我们把图 VII-8 d 中所表示的一切可能的波长分为两群，中间用一条垂线分开，以 λ_0 为标志，那么，在 λ_0 右边可能的振动总是有限多个，而在 λ_0 和零点之间则是无限多个。能量均分原理要求，不管 λ_0 大小，有效的能量都得分给比 λ_0 短的振动。因此，如果琼斯立方体中充满红光，这种光就要开始转变为（经过煤屑的吸收和再发射）紫外线、X 射线、γ 射线等等。对于假想的琼斯立方体是正确的东西，也一定是普遍正确的。所以我们在打开厨房的灶门或机车锅炉的炉挡时，就会被致命的短波辐射所击倒，就会即刻就地死去。这个结论显然是荒谬的，但是另一方面，它又是把一些最基本的经典物理定律应用于辐射能所得出的结果。

在琼斯的论文发表后的若干年内，无论是琼斯本人或是别的什么人，都不知道如何去解释这个不合理的结果。后来，在上个世纪最近一年的最后一个星期，德国物理学家普朗克（图 VII-9）在德国物理学会的圣诞会上走到黑板前，提了一个令人感到意外的建议。他的观念是：光和所有其它种类的电磁辐射过去总被看成是连续的波列，而它们实际上是由一个个能量包组成的，每个能包有着完全确定的能量。每个能包的能量与其振动频率 ν 有关，与它成正比，所以我们能写成：

$$\varepsilon=h\nu$$

式中 h 是一普适常数。普朗克把这些能包称为**光量子**，（或一般地

称为辐射量子),常数 h 称为量子常数。

那么，普朗克这个革命的观念是怎样消除了琼斯的紫外灾难这一危机的呢？为了使读者看出它怎样能消除这一危机，让我们考虑一个例子，比如有一个人死后留下一笔遗产，比方说有600镑。他没有继承人,而只有五个债权人：酒店夥计、屠户、药房老板、食品商和裁缝，他们都想要这笔钱来抵债，而总的债务大大超过这笔遗产。一个简单的解决办法是应用“均分定律”,给他们每个人120镑。但每个债权人只想拿到他全部的债款,要么就不干,事情就复杂了。酒店夥计想拿到600镑抵债，屠户和药房老板每人想要300镑,而食品商要求200镑,裁缝要求100镑。因为没有足够的钱来偿付所有这些债务,法官就得按照律师们都知道的“均衡法”来解决，即按常识来解决。如果把600镑全都给酒店夥计，让其余的债权人一个子儿也拿不着，那显然是不合理的。比较合理的解决方法是花较多的钱满足要求较低的债权人，而拒绝讨款太高的债权人的要求。例如,可以给裁缝100镑，食品商200镑，屠户或者药房老板300镑(可用掷硬币的办法决定)，而酒店夥计一点儿也不给。(这里可以指出,这种分配钱的原则实际上也是国家科学基金会所用的办法,这笔钱很少,需要在各种订有合同的申请人之间合理进行分配。)均衡法是否是这类问题的唯一合理的解决办法很值得怀疑，但统计物理中就是这么办的。普朗克关于不同波长的光量子有一最小能量值的假说一经提出，精确的数学统计法就开始起作用了，对很多短波长的振动根本不能分配什么能量，因为它们的要求高得不合理。结果，人们就得出了一个热辐射能量的分布公式，按照这一公式，大部分能量是给平均波长的，而要求太高的短波振动只能得到很少的能量，甚至一点儿得不到。

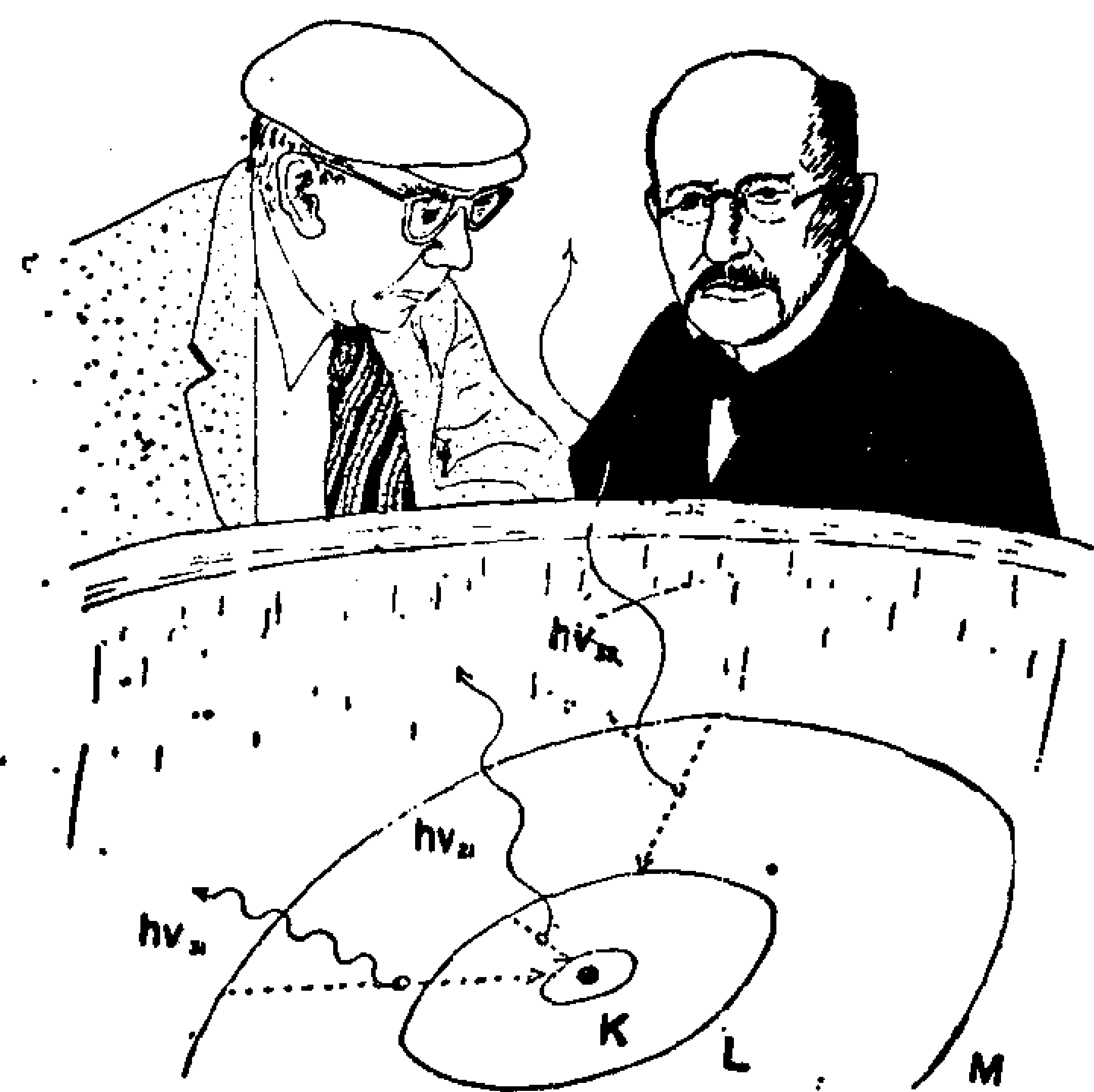


图 VII-9 玻尔(左)和普朗克,以及氢原子的量子跃迁。

结果证明，普朗克根据其光量子假说所导出的公式完全符合热辐射所有已知的定律。但是，由于把一份份的能包观念引入了光波传播的经典图象中，却产生了观念上的一场革命，这场革命只有迈克尔逊-莫雷实验所导致的革新可以与之比拟。

光量子的实在性

虽然普朗克原来关于辐射能包的概念还是相当含糊不清的，而且它只是用来作为辐射谱中不同波长之间统计能量分布的基础，但是五年之后，它在爱因斯坦手里已经取得比较明确的形式了。爱因斯坦在他于 1905 年发表的三篇论文中，有一篇是用光量子的概念来解释所谓的“光电效应”*。在此不久前已经知道，照射到金属表面上的光(特别是紫外光)能使金属带正电荷。发现了电子之后，人们证明了这个效应是由于有电子从被照射的表面发射出来。

研究光电效应的标准装置如图 VII-10 所示。从电弧 *A* 发出的光(其中含有大量紫外线)通过两只石英透镜和一块(单色)棱镜

* 我们已经说过，其余两篇是关于布朗运动和相对论的。

所组成的系统，棱镜能把不同的波长分开。被选出的光束（转动棱镜即可加以改变）通过石英窗口进入真空管 T 中，再通过铜圆筒 C 的底部上一个小孔落到金属板 Pl 上，Pl 可用不同的金属材料制

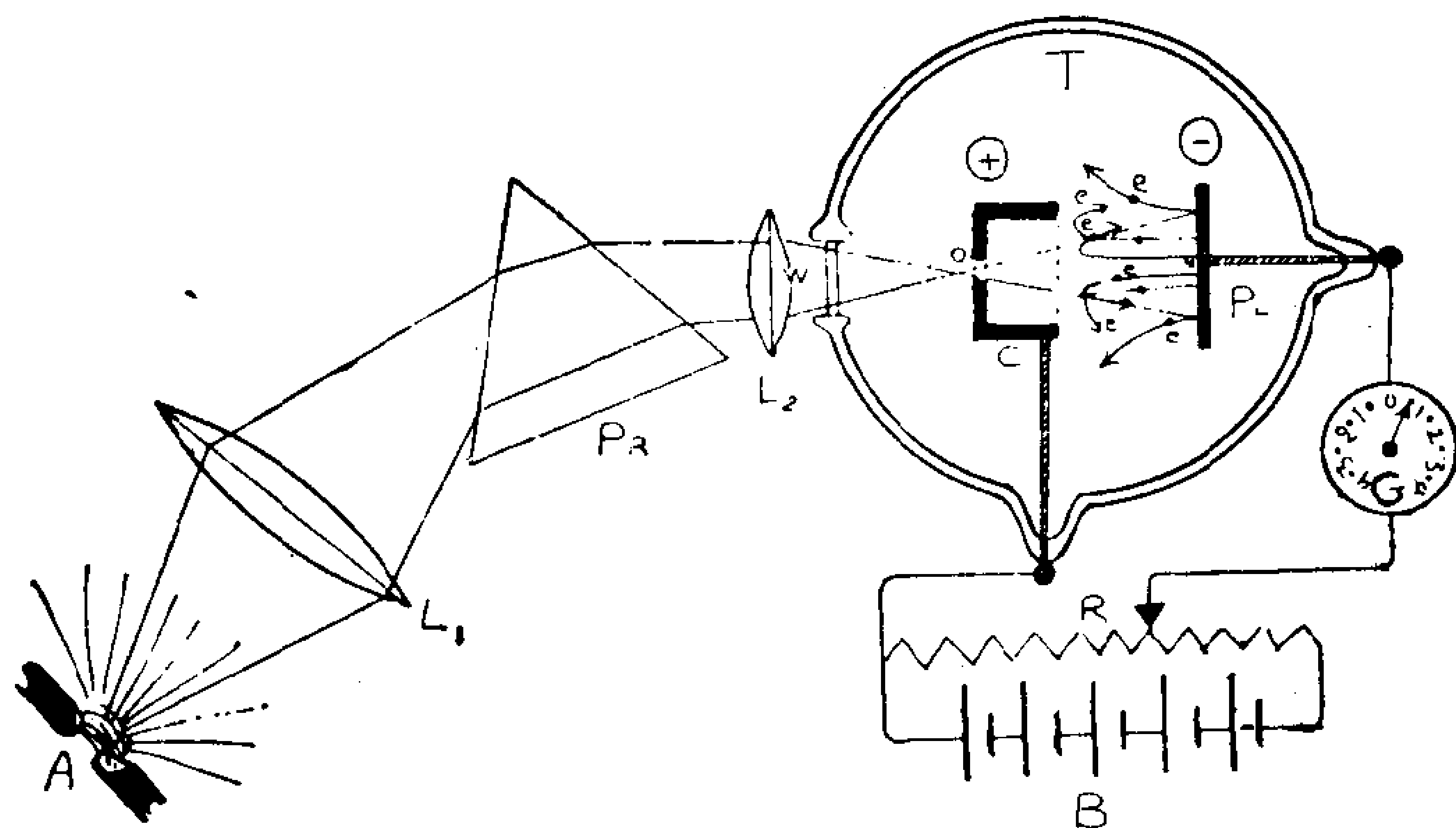


图 VII-10　研究光电效应的装置。从金属板 Pl 发射出的光电子飞向圆筒 C，若 Pl 和 C 之间的电势差足够大，它们即被电场所遏止。（译注：电池极性在实验中应可以反向。使光电子减速的电势与图中的极性相反。）

成。金属板与圆筒之间的可变电势，能使发射出来的光电子的运动减速。（用电池 B 和可变电阻 R 提供电压，而用检流计 G 测量电流。）当所加的电势与电子电荷的乘积变得等于它们的动能时，电路中的电流就停止了。这样，改变入射光的强度和波长，并测出电流截止时的电势，便可求出光的强度和频率与光电子的速度之间的关系。从光电效应的实验研究可以得出两条规律：

I，对于给定的入射光频率，发出的光电子能量不变，但光电子的数目随光强成正比地增加。

II，当入射光的频率变化（增大）时，在达到某一临界频率（与所用的金属材料有关）之前是不会有电子发射出来的。在较高频率下，光电子的能量与所用频率和临界频率之差成正比地

增加。

这两条规律若用图形来表示，则如图 VII-11。然而，这些很简单的规律却完全不符合光的经典电磁理论的预言。按照经典的电磁论，光强增加意味着电磁波的振荡电力的增大。作用在金属表面附近电子上的(就是这些电子带着电流通过导线的)这一电力

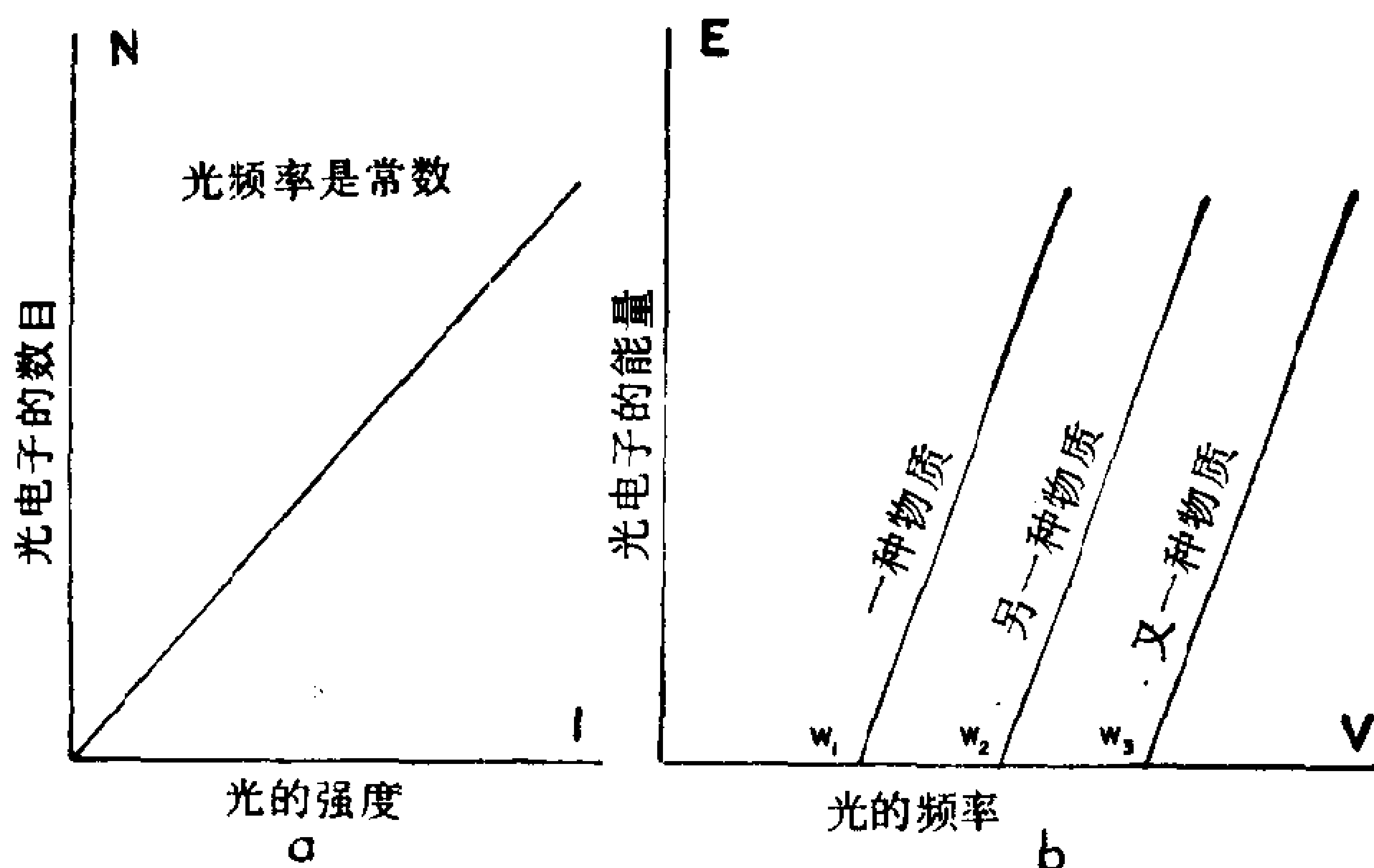


图 VII-11 实验发现的光电效应的定律。(a)光电子数与光强的关系。(b)光电子能量与光的频率的关系。

越强，电子射出时具有的动能就越高。但是实验表明，即使光强增大百倍，光电子出来时的速度也完全一样。另一方面，图 VII-11 中的曲线表示电子的速度(或动能)和入射光的频率之间具有很明确的关系，而在光的经典电磁理论中，这一关系看来是毫无道理的。

然而，如果利用光量子的观念，认为光量子带有与其频率成正比的确定的能量，我们就能很自然地解释这两条实验规律了。当一个入射光量子击中金属表面并与其中一个电子相互作用时，它必须把它全部的能量都传给这个电子，因为比一个量子小的能量

是不可能有的。入射光的强度的增加，意味着具有同一频率的光量子增多，所以具有相同动能的电子就成比例地增多。当入射光的频率增大时，情况就不同了。现在每个光量子的能量增加了，因此把它传递给电子时，电子从金属中挣脱出来后的速度就加大了。在通过金属表面时，电子从光量子得到的能量中要损失掉一部分；这部分能量的大小与金属的性质有关，它被称为“功函数”(这个名称是很不恰当的)。因此，光电子的能量由下一很简单的公式决定：

$$E = h\nu - W$$

式中 W 代表有关金属的功函数。如果 $h\nu < W$ (或 $E < 0$)，电子从光量子那里就得不到足够的能量穿出金属表面，因而不会发生什么光电效应。当 $h\nu$ 一旦大于 W 时，就开始发射光电子，而且光电子的能量随着 ν 线性地增加。图 VII-11 b 中直线的斜率必须等于量子常数 h，情况的确如此。这样，爱因斯坦一下子就解释了光电效应的神秘规律，并且有力地支持了普朗克原来关于辐射能包的观念。

光量子假说在那时已经够得上称为一种理论了，对它的另一有力支持就是美国物理学家康普顿的工作。康普顿是研究宇宙射线的一位伟大学者，而且是夏威夷吉他的爱好者，又是一位优秀的网球选手。他在宇宙射线方面的研究曾使他获得了全墨西哥大力士的名气。康普顿本人告诉作者的情况是这样：在研究宇宙射线的强度从两极到赤道的变化规律时，康普顿曾到墨西哥南部某地去测量宇宙射线强度。测量地点必须远离城市，以免动力线、来往交通等等引起干扰，但是另一方面，又要求这个地点有足够良好的电力供应。最后是选择了墨西哥城南某地的一个天主教修道院，这地方很安静，有自己的电站和蓄电池组，院长又是一位热心科学

发展的人。康普顿带了大约一打装着科学仪器的箱子到了修道院附近的火车站，这些看起来匀整灵巧的木箱，大小与中等的手提箱差不多，都装有金属的手把。有两只箱子里装着四只"大头菜式的电表"，这是一种黑色的金属球，上面有一些小窗，通过它们能看到记录电荷的游丝。其余的箱子里装着屏蔽辐射用的铅块。

到过墨西哥的人都知道，旅客一到站就会被一群赤脚的男人和孩子围住，他们一边招呼着一边把行李从你的手里接过去。在这种情况下，康普顿就拿起了两只装着电表的箱子，让墨西哥人去提其余的木箱。于是这些人排成了一行；一位美国绅士手里提着两只仪表箱摇摇摆摆地在月台上轻松地走着，后面跟着一队墨西哥人，每人也提着两只箱子，却都被压弯了腰。但这还不是这段冒险经历的结束。当车子把康普顿和他的仪器运到修道院的大门时，遭到两个墨西哥士兵的阻拦，他们要求检查行李。原来那时墨西哥政府正与天主教会发生了尖锐的矛盾，在所有的教会机构周围都设了岗。士兵们打开箱子后，发现有"四颗黑色的炸弹和大量的铅"，他们大概以为铅只能用来制造子弹，于是康普顿被逮捕了，并且不得不在当地警察局里呆了好几个小时。直到同老远的墨西哥城里美国大使馆通话之后，问题才得到解决。实验结果表明，这座修道院里宇宙线的强度与预期的结果是完全一致的。

让我们还是回到康普顿效应吧。康普顿是一位固执的实验家，他想具体看到光量子与电子之间的碰撞，就象看到台球桌上弹子球之间的碰撞一样，不同的只是这样一个事实：弹子球全都是一样的(只有颜色不同)，而光子和电子得看成是质量不同的球。康普顿认为，尽管构成原子行星体系的电子在静电吸力的作用下被束缚于中央原子核的周围，但当带有足够大的能量的光量子击中它们时，它们就会表现得完全象是自由的一样。假定有一黑球(电

子)静止在台球桌上,并被一根钉在桌面上的绳子束缚着，打球的人没有看到这根绳子,而想用一只白球(光量子)去碰击它,把它打到角落上的球袋里去。如果玩球的人以较小的速度把球送出去,因为碰撞时有绳子栓住，他的目的就达不到。如果白球运动得较快,绳子说不定就断了,但这时绳子可能引起足够大的干扰,把黑球送到完全错误的方向。然而，如果白球的动能大大超过束缚着黑球的绳子的强度,绳子的存在实际上就起不了什么作用,两球之间碰撞的结果就会与黑球完全不受束缚的情况相同。

康普顿是知道原子中外层电子的结合能与可见光光量子的能量差不多的,为了使碰撞强有力而不致受阻,他在实验中选用了高频 X 射线的高能量子。X 射线量子与（实际上的）自由电子之间的碰撞结果表明，它在许多方面的确可以看成是两个台球弹子之间的碰撞。在几乎是正碰撞的情况下，静止的球(电子)会沿碰撞方向高速被弹出,而入射的球(X 射线量子)将失去其大部分能量。在斜碰撞的情况下,入射球失去的能量较少,离开其原轨道遭受的偏转也较小。在仅仅擦边的情况下，入射球实际上不遭受偏转而继续前进,只损失极少的能量。用光量子的语言来说,上述情况就意味着在散射过程中，遭受大角度偏转的X射线量子将具有较少的能量，因此具有较长的波长。康普顿的实验完全证实了理论的预言,这就进一步支持了辐射能量量子化的假说。

玻尔的原子

1911 年，一位名叫玻尔的年轻的（25 岁）丹麦物理学家(图VII–9)来到了曼彻斯特，他在哥本哈根大学学习期间，作为一名全国闻名的足球运动员，曾把他踢球的经验运用在 α 粒子穿过密集原子时“散射”的问题上，这些原子是力图要扭住对方堵住它

们的。这时候卢瑟福刚刚做完他那划时代的实验,发现了原子核。玻尔是喜欢卢瑟福的观念的,卢瑟福也曾对一位朋友说过:“这个年轻的丹麦人是我遇到过的最有才智的小伙子。”这样,他们就成了朋友,以后一直是亲密的伙伴。

要向一个从来没有同玻尔共过事的人描述他,实际上是不可能的。玻尔最大的特点也许就是他的思维和理解力的缓慢。二十年代末三十年代初,本书作者也是“玻尔的孩子们”之一,在哥本哈根玻尔研究所里的“卡尔斯伯格”(世界上最好的啤酒牌子!)联谊会工作,所以有许多机会观察他。晚上,一小批玻尔的学生就在帕·布莱格达斯温津学会里“工作”,讨论量子论的最新问题,要不就在图书馆的桌子上打乒乓,桌上放一些咖啡杯子,使比赛变得更为有趣。这时玻尔往往也会出现,声称他已经很累了,想“干点什么”。所谓“干点什么”,无疑就是要去看电影,而玻尔喜欢的片子不外是那些“懒人农场大战”或“寂寞的守林人与印第安姑娘”之类的片子。不过与玻尔一道看电影真是件苦事,他老是跟不上情节的发展,不住地向我们提问题,让其余的观众讨厌透了。“这个人是不是那个牧童的姐姐,是那个牧童开枪打中了想偷他姐夫牛群的印第安人吗?”他提的差不多都是诸如此类的问题。

在科学会议上他也明显地表现出反应的迟缓。常常会有来访的年轻物理学家(访问哥本哈根的物理学家大都是很年轻的)就自己对某个量子论的复杂问题所进行的最新计算发表宏论。每个听的人对论证都会清清楚楚地懂得,唯独玻尔不然。于是每个人都来给玻尔解释他没有领会的要点,结果他们自己也搞乱了,原来自己也不懂。最后,经过相当长的时间后,玻尔开始弄懂了,结果表明他对来访者所提问题的理解与访问者自己的意思完全不同,而且玻尔的理解是正确的,来访者的解释却错了。

玻尔对美国西部电影的爱好是出于他的一种理论，这种理论除了他当时的电影伙伴外谁都不知道。大家都知道在所有的美国西部影片（至少是好莱坞式的影片）中总是恶棍先拔枪，但英雄动作更快，总是把恶棍打倒。玻尔认为这种现象是由于有意行为和有条件反射行为之间的差别。恶棍在抓枪时得先决定是否开枪，所以动作就慢了，而英雄的动作快是因为他的行为不需思索，一看见恶棍就开枪。我们都不同意这种理论，第二天早上作者就到玩具商店买了一对牧童枪。我们和玻尔一起出去打枪，他扮演英雄，结果他把我们全都"打死"了。

另一个证明玻尔思维缓慢的例子，是他不能很快猜出纵横字谜的谜底。有一天晚上，作者到玻尔的座落在梯斯维里里吉（日德兰半岛北部）的乡间别墅去，玻尔和他的助手罗森菲尔德（比利时人）正在那里讨论一篇关于电磁场的测不准关系（见后）的论文，已经工作了整整一天。由于整天工作，玻尔和罗森菲尔德两人全都精疲力竭了，于是在晚饭后，玻尔提议"轻松一下"，猜猜一本英国杂志上刊登的纵横字谜。结果他猜不出来，大约一小时后，玻尔太太建议大家都去睡觉。夜里不知什么时候，同住在楼上客房的罗森菲尔德和我突然被敲门声惊醒了。我们在黑暗中跳起来喊道："什么？出了什么事？"门外传来了低低的声音："是我，玻尔。我不想打搅你们，不过我想说说那个字尾是 *ich* 的用七个字母组成的英国工业城市的名字是 Ipswich！"

"我不想……不过……"是玻尔的口头禅，他常常手里拿着一本打开的杂志，一边走进来一边说："我不想加以批评，不过我想弄明白，一个人怎么能写出这样毫无意义的东西！"

在我们转到玻尔的原子论之前，再讲一个关于他的真实故事。一天深夜（大约是哥本哈根时间午夜十一点钟），作者与玻尔、玻尔

夫人和一位荷兰物理学家卡西米尔从玻尔研究所一位同事家里吃晚饭回来。卡西米尔是个老练的"活宝"，常常可以在研究所的图书馆里看到他高高坐在靠近天花板的地方，手里拿着一本书，两条腿伸在书架顶上。我们在寂静的大街上走着，经过一家银行。银行的正面是由一块块巨大的水泥板组成的，水泥板之间有一些阿尔卑斯爬山家们称之为落脚点的地方，这引起了卡西米尔的注意，他走过去大约向上爬了两层楼的高度。当他下来后，玻尔也想试试自己的技艺，于是慢慢爬上银行的墙壁。玻尔太太、卡西米尔和我站在下面都有点害怕，注视着玻尔爬墙的缓慢动作。这时有两个夜间巡逻的哥本哈根警察从后面很快跑来了，准备采取行动。他们看到了正挂在一层楼和二层楼中间的玻尔，其中有一位说："哎呀！这不是玻尔教授吗！"这下他们完全放心了，于是这两位法律和秩序的保卫者就安静地走开了。

在这些往事的回忆之后，让我们现在来讨论玻尔的原子理论，它发表于1913年，其依据是卢瑟福的发现，即原子有一个重的、带正电的核，周围有一群电子绕核转动，就象一个微小的行星系那样。对于这个图象玻尔遇到的第一个困难就是原子的稳定性：原子不可能以这种模型稳定存在。实际上，一个在轨道上快速转动的电子相当于一个电振子，它一定要发射电磁波，因而很快失去其能量。容易计算，原子中的电子这时会沿螺线运动，并在一亿分之一秒的时间内就会落到原子核上。但事情当然并非如此，因为原子是完全稳定的结构。这种情况与琼斯的紫外光灾难一样，是一种佯谬。对玻尔来说，解决困难的办法显然要遵循同样的路线去寻找。如果辐射能量只能取一定的最小数量或者是其倍数，那么，关于电子绕核运动的机械能量为什么不能作同样的假设呢？在这情况下，基态原子中电子的运动应对应于最小的能量，而激发态则

对应于较多数目的这些机械能的能量子。因此，一个原子系统的行为在一定程度上应当象一个汽车减速箱那样，我们可以把它放在最低档，第二档或最高档，但不能放在两档之间。如果原子中电子的运动和它们所发射的光都是量子化的，那么，电子从原子中的高量子态跃迁到低量子态时就一定要发射光量子 $h\nu$，其能量等于两能态之间的能量差。反之，如有一入射光量子 $h\nu$ 等于给定一原子的基态与激发态之间的能量差，此光量子就会被吸收，电子就会从低能级运动到高能级。物质和辐射之间的这种交换的过程可用图 VII-12 a，b 来表示，并由此可以得出一个很重要的结论。如果

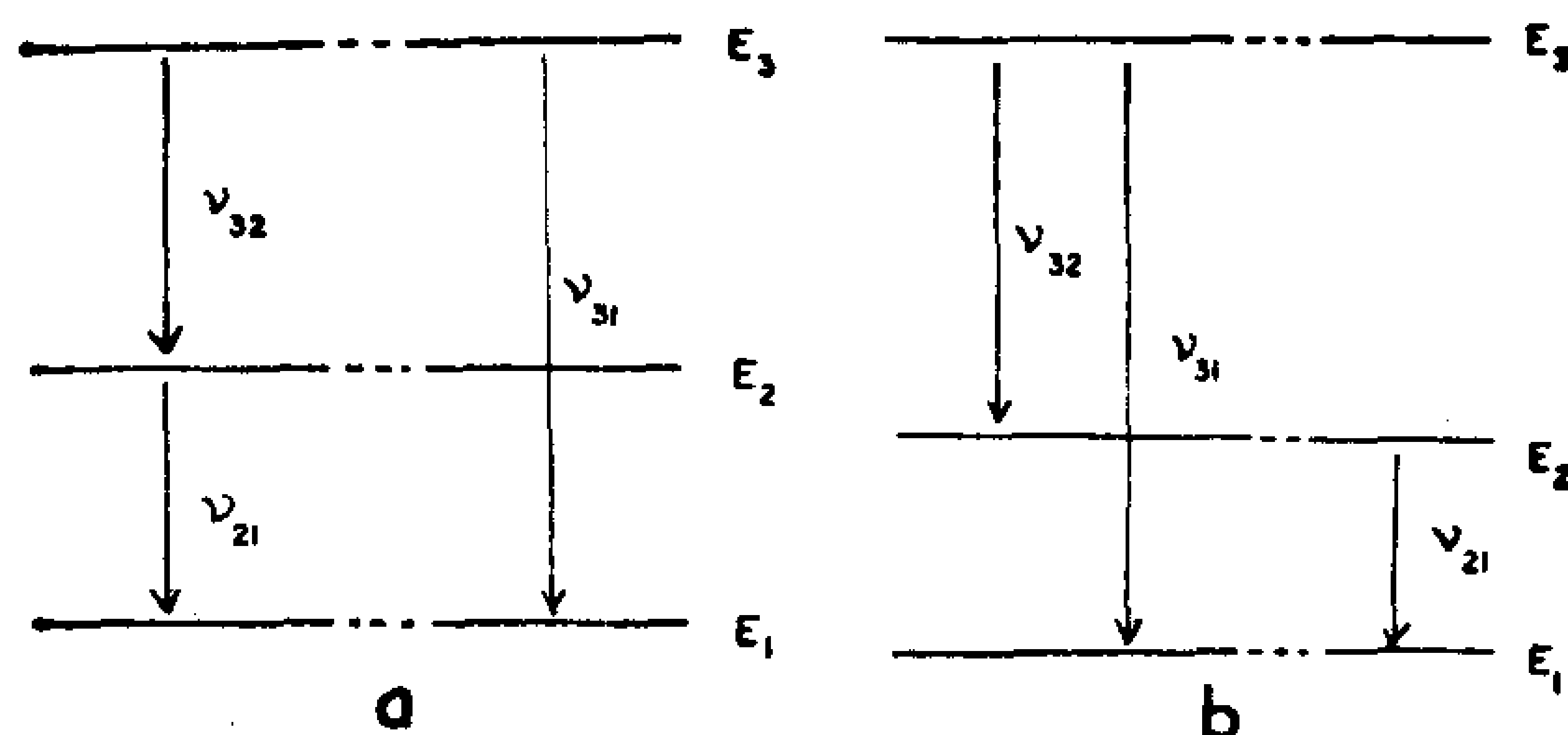


图 VII-12 里德堡原理说明。a)如果电子可从能级 E_3 跳变到能级 E_2，发射频率为 ν_{32}，然后又从 E_2 跳变到 E_1，发射频率为 ν_{21}，那么它也一定可能从 E_3 直接跳变到 E_1 而发射频率为 $\nu_{31}=\nu_{32}+\nu_{21}$。b)如果电子可从 E_3 跳变到 E_2，发射频率为 ν_{32}，或者从 E_3 跳变到 E_1 而发射频率为 ν_{31}，它也就一定可能从 E_2 跃迁到 E_1，发射频率 $\nu_{21}=\nu_{31}-\nu_{32}$。

电子在从能态 E_3 跃迁到能态 E_2 时能发射一能量为 $h\nu_{32}$ 的光量子，从 E_2 跃迁到 E_1 发射能量为 $h\nu_{21}$ 的光量子，那么我们就应当观测到（至少在某些情况下能观测到）能量为 $h\nu_{32}+h\nu_{21}=h(\nu_{32}+\nu_{21})$ 的光量子，它相当于从 E_3 直接跃迁到 E_1。类似地，如果原子可发射能量为 $h\nu_{31}$ 和 $h\nu_{32}$ 的光量子，我们就可指望它也能够发射能量为 $h\nu_{31}-h\nu_{32}=h(\nu_{31}-\nu_{32})$ 的光量子。删去 h 后，我们可以

说，如果在一给定原子的光谱中测到某两个发射频率，则它们之和及它们之差也可以在光谱中找到。但这正是所谓的“里伯堡原理”，它是德国光谱学家里德堡早在量子论问世之前很久就已在实验中发现了。

上述所有的事实，都毫无疑问地证明了玻尔关于机械能量子化的基本概念是正确的，剩下的问题只是要去找出这种量子化所遵循的规律。为此，玻尔考虑了所有原子中最简单的情况，即氢原子。按照前面的讨论，氢原子是由一个带正电的原子核和一个在周围转动的电子所组成，我们现在把这个原子核称为质子。氢的可见光谱由四条线组成——一条红的，一条蓝的，两条紫的——但在研究紫外区时，发现了大量短波长的谱线。氢的光谱如照片II所示，谱线是按振荡频率增大的顺序排列的。这些谱线序列排列得越来越密集，在高频端趋近一确定的极限，它们在光谱学中称之为线系，氢的线系是最标准、最有规则的。1885年，一位德国教师巴尔末发现了氢的谱线（现在称之为巴尔末系）可用一个很简单的公式来表示：

$$\nu = R\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2}\right)$$

其中 R 是一常数，n 取值为 3、4、5、6 等等。（n 显然不能等于 1 或 2，因为这时 ν 就会变为负值或等于零。）将此式乘以 h，在左边就可得到氢所发射的光量子的能量，即

$$h\nu = Rh\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2}\right)$$

根据简单的算术法则，玻尔把它改写为

$$h\nu = Rh\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

由前面讨论中可知，$-\frac{Rh}{n^2}$ 应代表电子在氢原子中的能级，电子在这些能级之间发生的跃迁，便导致巴尔末线系的发射。我们在这个量的前面写一负号是因为原子中电子的轨道能量是负值，其意义只是表示电子的动能小于它们在电场中的势能，因此电子不能逸出电场。电子绕原子核的怎样一种运动会对应有这些能量值呢？

回答这个问题的最简单方法就是要记住，库仑势能是与电子到力心的距离成反比变化的。既然巴尔末公式中每一项的变化与整数 n 的平方成反比，故可得出结论，相邻量子轨道的半径一定是随 n^2 而增大的。在玻尔首先讨论的圆轨道情况下，各轨道的相对尺寸大小如图 VII-13 所示。电子从其余轨道向第二层轨道的跃迁，对应于巴尔末线系。但其它可能性如何呢？电子从第二、第三、第四等等轨道向第一轨道跃迁时，一定形成一个类似于巴尔末系的线系，但它们集中在光谱的远紫外部分。另一方面，从较高轨道向第三轨道跃迁一定是给出远红外区的线系。这两个线系已由光谱学家喇曼和帕森发现了，它们的存在有力地证实了玻尔的电子跃迁理论。

知道量子轨道的半径是随整数的平方而增大以后（圆轨道的假设下），玻尔便能求出哪一力学量是“量子化的”，即它从一个轨道过渡到另一轨道时将增加同一数量。结果证明，这个力学量乃是电子的动量与其轨道半径的乘积，这个量在经典力学中称之为作用量。后来证明了，作用量从一个量子轨道到另一量子轨道的变化恰好等于普朗克在其热辐射理论中所用的量子常数 h，也就是爱因斯坦在解释光电效应时所用的那个常数。

很快就弄清楚了，玻尔的同心圆量子轨道的原始模型必须加

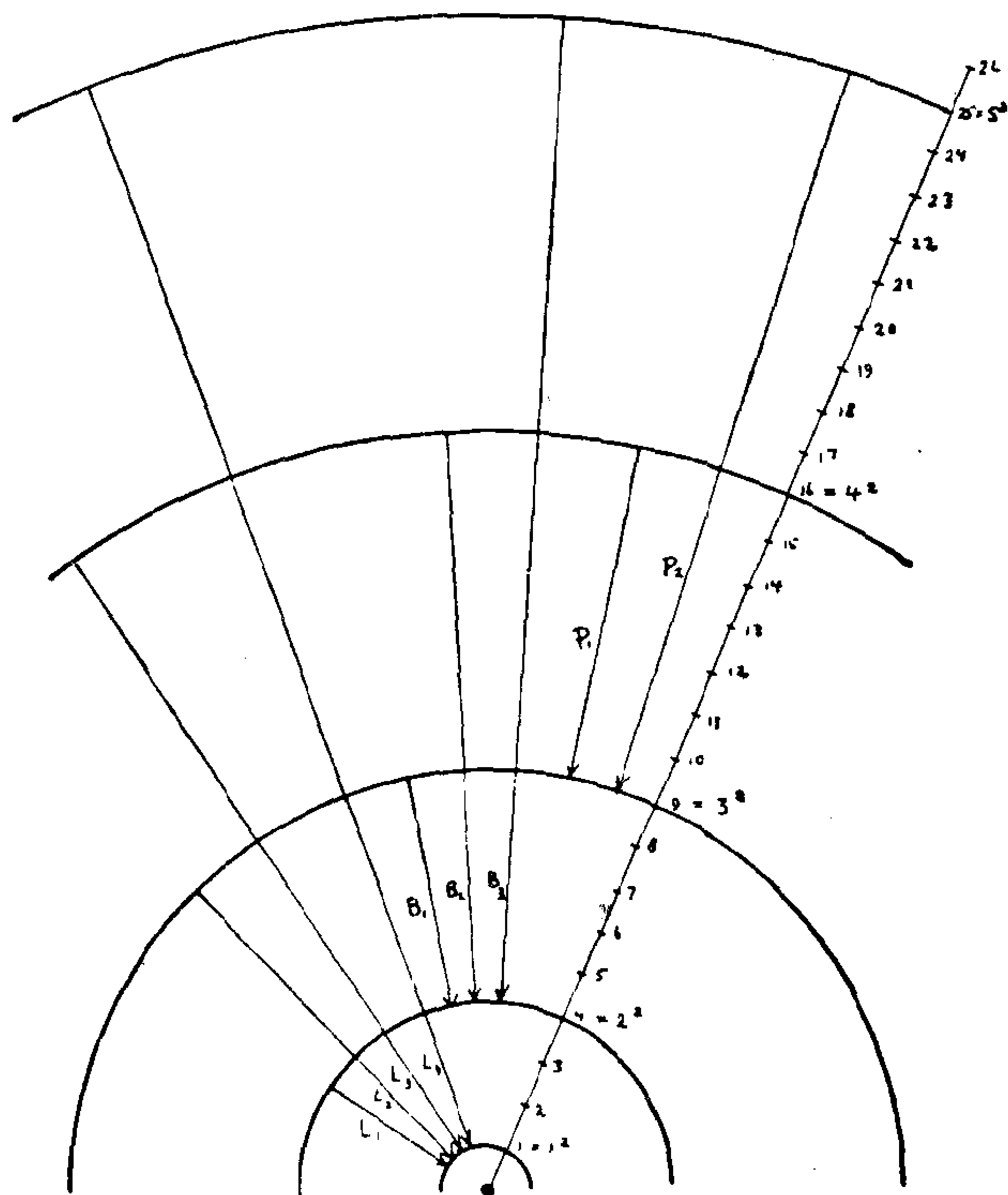


图 VII-13 玻尔氢原子模型的前四个圆轨道，其半径随整数的平方而增大。向第一轨道的跃迁 L_1、L_2、L_3、L_4…… 产生喇曼线系。向第二和第三轨道的跃迁 B_1、B_2、B_3……和 P_1、P_2、P_3……产生巴尔末线系和帕森线系。第一量子轨道的半径等于 0.5×10^{-8} 厘米。

以推广，需要另外引入一些量子化的椭圆轨道。这一推广是由德国物理学家索末菲完成的。图 VII-14 画出了氢原子中的电子可能具有的一组完全的量子轨道。第一个圆形轨道(实线)保持原状不动。在第二圆轨道(虚实线)外，索末菲又加上了三个椭圆轨道，电子在这些轨道上运动时具有和圆形轨道相同的能量。第三圆轨道外加了八个椭圆轨道(图中只画了其中的三个)，它们所对应的

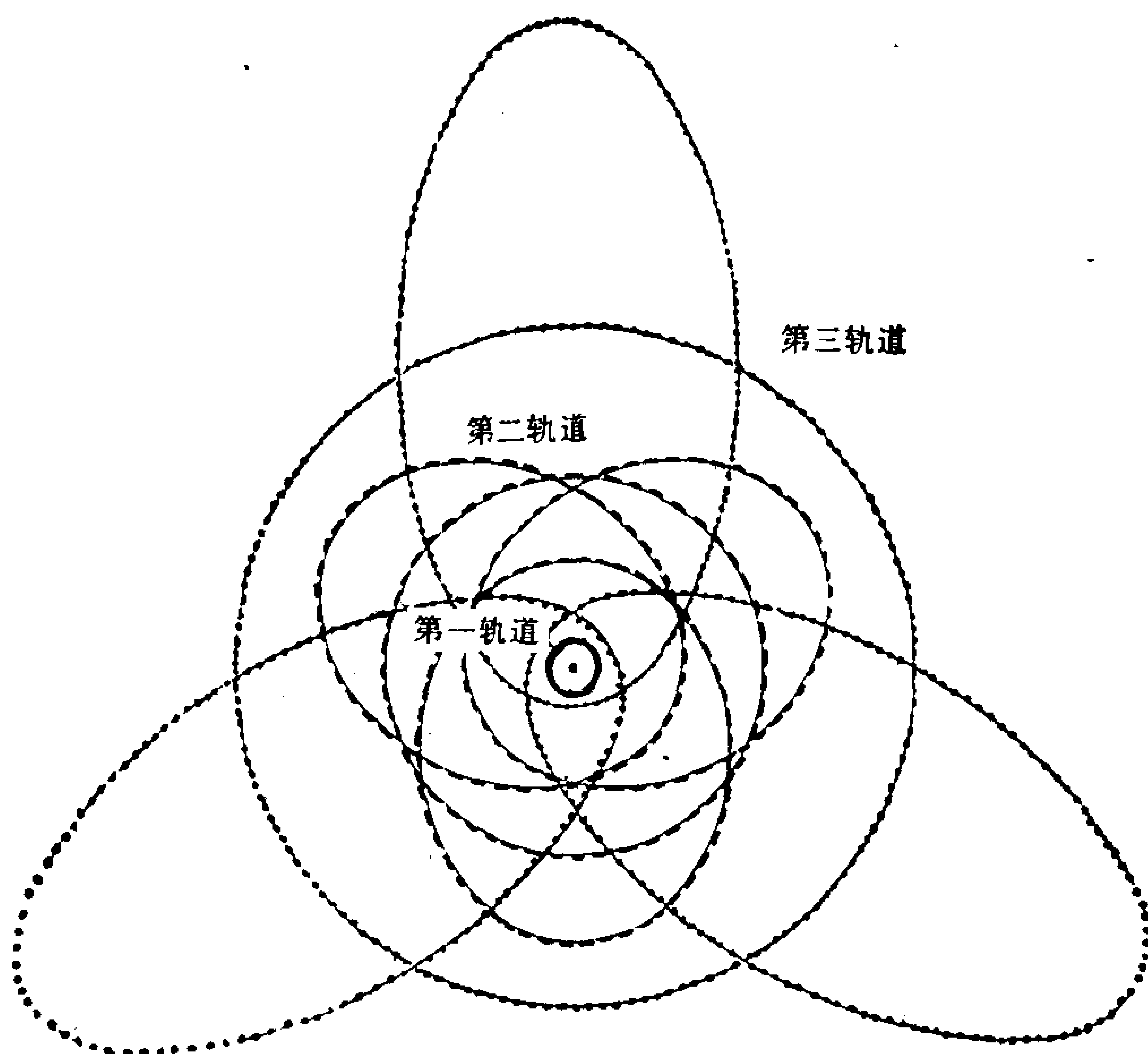


图 VII-14　氢原子中圆和椭圆的量子轨道。第一圆形轨道(实线)对应于电子的最低能态。下面四个轨道中有一个是圆轨道，其余三个是椭圆轨道(虚实线)，它们所对应的能量都相同，但比第一轨道的高。再下面九个轨道在图中只画了四个(虚线)，它们所对应的能量更高(所有九个轨道的能量全相同)。

能量全都和圆轨道相同。此外，圆轨道的级数越高，附加的椭圆轨道就越多。情况也变得越来越复杂，但是，非常值得注意的是，它们也越来越好地与观察事实相符。原子现在已不再象一个行星系了（因为"木星"可能会突然跳过"金星"的轨道），而要用一种抽象的结构来描述，它与经典力学中的圆和椭圆只有一定的类似关系。

在玻尔理论发展的最初十年间，它曾非常成功地解释了复杂原子的性质、它们的光谱以及化学反应等等。但是，经过这一切成

功之后，玻尔理论仍保持其原来的特色，即只提供了骨架，至于皮肉，即想用它来解释电子从一个能态向另一能态的跃迁并计算这些跃迁所发射谱线的强度时，所有的尝试都得不出什么结果。一位俄国理论物理学家福克在二十年代初所写的一首诗对这种情况做了很好的描写，现在我们用自由体把这首诗译成英文如下：

尼·玻尔颂*

斟满美酒，燃起火堆，
为他干一杯，干一杯，再干一杯！
拉起我们的七弦琴，
歌颂我们的英雄和伟人
——尼尔·玻尔的丰碑。
祝您幸福如意，
光荣归于您，
请接受我们衷心的赞美！
玻尔——我们敬畏您，崇拜您，
您与太阳神阿波罗的形象同辉！

您的丰功伟绩无穷无尽；谁也无法诋毁，
谁说您的理论狂乱暗晦？
是您宣布了这一伟大理论，
我们绝不允许他人诽谤捣鬼！
您的话就是上帝的话，
发出真理的光辉！
尼尔，您是阿波罗，
您发明的定律将永世长存，
我们谦恭驯服地把您追随。

* 福克作于二十年代初期，未曾发表。由本书作者译成英语。

力学是您的忠实奴仆，
没有您的认可，
它的训条就一条也不对。
如果您认为合适，
甚至能量定律也可以让它一风吹。
是您离开您的宝座吐上了一口口水，
就淹死了“连续运动”这个凶魔怪鬼！

因果律的地位岌岌可危，
为了得到您的宠爱也来向您献媚。
但是谁能预料，
也许有一天由于您突如其来的意志取舍，
它也会被抛入地狱去受罪。
还有人们关于92种物质的种种议论，
也是您驱散了迷雾迎来了朝晖！
在冗长的百科全书中，
理论与实验的背离积压成堆，
都被您一一予以驳回。
量子拜倒在您的脚下，
在您颁发的布告上，
每个细小电子的状态都受您的检查，
限定了它们的道轨。
它们在轨道上横冲直撞，发出辐射，鼓翼横飞，
您估算它们的高度，预测它们的运动，
您创造了概念——把原因和结论混合起来，一鸣惊人，
让电子从它们的基本轨道向另一个轨道直飞，
在飞行中要寻找避难所则是心机枉费。

对玻尔的颂扬来自各个尊贵民族的人类，
您是引导我们的主宰，
您神秘而高贵的主张使我们深深敬畏。

即使把我们每个人的脑袋掏空一半，
留下的还是对您的忠诚，
绝不会有一句对您的谤毁。
我们从头至尾地吞下您的理论，
——干一杯，干一杯，再干一杯——
即使对您的话一字不懂也绝不后悔！

玻尔的原子模型与元素周期表

讨论了氢原子中单个电子的运动之后，我们就应当转到原子中有 2 个、3 个、4 个或更多个电子的情形。当原子核带有较多的正电荷时，量子轨道总的模式仍与氢原子的情形一样，但这时由于原子核的引力较大，所以当我们过渡到原子序数越来越高的元素时，各个轨道的直径就变得越来越小。

在较重元素的原子中，大量电子是怎样被容纳在这些缩短了的量子轨道上呢？在经典物理学看来，这个问题的答案是极其简单的。任何一个力学系统最稳定的状态，就是它不能再失去能量而降到更低能级的状态。所以，也许我们指望重原子中所有附加的电子都要降到第一量子轨道，"围着玫瑰转圈圈"，或者更确切地说，"绕着原子核转圈圈"。但由于我们知道在重元素中这个圈圈的直径越来越小，所以可以预料，电子也就会越来越紧地挤在一起。而实际情况并非如此，尽管原子核的电荷不同，原

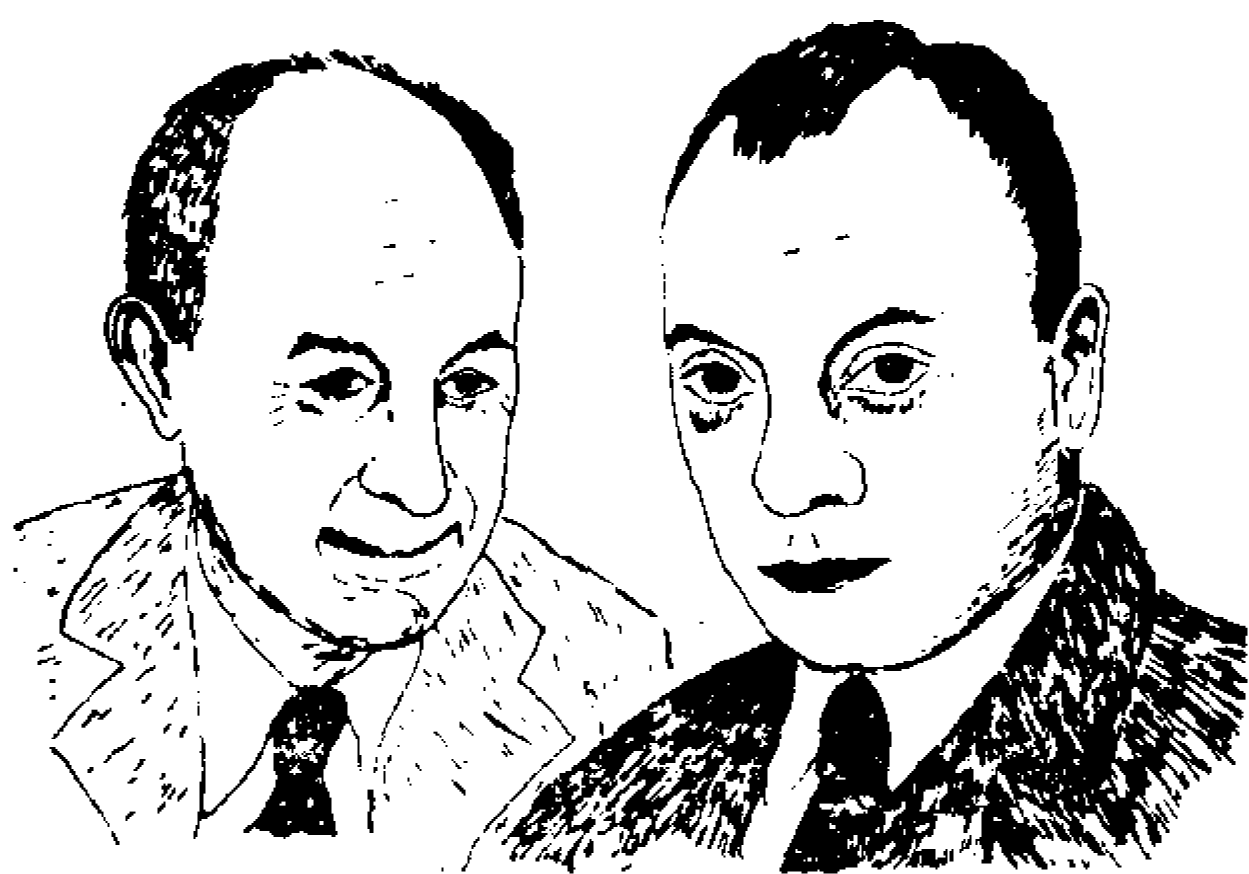


图 VII-15 费米(左)和泡利。

子的整个大小仍然差不多一样。

这个问题引起了德国物理学家泡利的注意(图 VII-15)，在玻尔的理论物理研究所里，大家都很熟悉他那胖胖的身影和快活的形象，对他十分欢迎。泡利是第一流的理论物理学家，在他的朋友当中，他的名字总是与泡利效应这种神秘的现象联系在一起。众所周知，几乎所有的理论物理学家在操作实验设备时都相当笨拙，常常轻轻一碰就搞坏昂贵而精密的仪器。泡利就是这样一位“优秀的”物理学家，他只要一走进实验室，事情就一团糟了。泡利效应有一个最有说服力的例子：有一天，哥廷根大学物理研究所弗朗克教授的实验室里的仪器突然莫名其妙地炸裂成了碎片，没有发现任何明显的原因。后来的调查表明，这个灾难发生的时间正好是一辆载着泡利从泽瑞奇到哥本哈根去的火车在哥廷根车站停了五分钟的时间。

泡利在考虑原子内部电子的运动时，提出了著名的泡利原理（他自已称之为“不相容原理”），按照这个原理，每个量子轨道最多只能容纳两个电子。这个原理要求，如果这两个空位被填满，其余的电子就必须填在其它的轨道上，当给定一个壳层的所有轨道都被填满时，就开始填充下一壳层（对应于更高的能级）的轨道。

如果我们顺着元素的自然顺序考虑越来越重的原子，则由于核电荷增加，量子轨道的半径要缩短，但是另一方面，电子所占据的轨道也越来越多。所以不论是轻元素还是重元素，它们的原子平均说来还是保持着差不多相同的大小。不过，从一个满壳层到下一壳层过渡时(即从惰性气体向下面的元素过渡时)，原子的大小还是略有差别。这就造成各种不同元素的密度有着微小的周期性变化，同时它们的化学性质也发生周期性的变化。

周期表中所有各种原子的电子壳层都是按照这一固定的能态结构来填充的。第一壳层是最低的可能能态，首先从它开始充填。在氦原子中，这一壳层被两个电子填满，它们绕着第一量子轨道互相追逐着。下一个元素是锂，有三个电子，根据不相容原理，其中有一个必须加到第二壳层中，这一壳层是由一个圆形轨道和三个椭圆轨道组成。因为这四个轨道共可容纳八个电子，加上内层的两个电子，所以第一和第二壳层在氖原子时将被填满，它有十个电子。在更重的元素中，额外的电子必须加在第三组圆或椭圆轨道上，依此类推，泡利不相容原理就是这样认为依次填充着电子壳层而解释了元素的内部结构的。在周期表的原子序列中，泡利原理也是解释原子的外部性质或化学同一性和化学性质周期性的基础。这些特性取决于原子外层的电子数，当原子彼此碰撞时，发生接触的就是这些电子。

在泡利原理刚提出的时候，人们一直以为电子无非是一些带负电的点电荷。但是很快就发现，我们还必须把电子看成是一些微小的磁石，它们具有磁矩，因为它们在绕着原子核的轨道上很快地自旋着。若是把电子看成是微小的磁石，我们就必须同时考虑电力和磁力，电力主要是决定电子的轨道运动，磁力则取决于电子的自旋。

电子自旋的方式有两种：或者是沿电子在其轨道上运转的方向，或者是沿相反的方向。现已证明，在同一轨道上运动的两个电子，其自旋方向必须相反。这个发现要求我们要用一种稍微不同的形式来表述泡利原理。由于沿相反方向自旋的电子建立起了微弱的磁场，略微改变了它们彼此的轨道，所以我们现在说，原来允许在同一轨道上运动的两个电子，实际上是沿两个不同轨道运动的（虽然它们很相近）。因此，把容许的轨道看成是在弱磁相互作

用下分裂开来的一对邻近的轨道是比较合理的。

这种原子壳层结构的观点，很简单地解释了不同元素化学价的本质。根据量子理论我们可以证明，具有接近满壳层的原子倾向于获取外界电子，以填满这一壳层，而一个新电子壳层刚刚开始的原子倾向于摆脱多余的电子。例如，氯(原子序数为17)在第一层有两个电子，在第二层有8个电子，第三层有7个电子，因此外层缺少一个电子。另一方面，钠原子(原子序数为11)的第一壳层有两个电子，第二层8个，第三层刚开始，只有一个电子。因此，当氯原子碰到钠原子时，它便"接纳"了后者仅有的一个外层电子，变成 Cl^-，而钠原子则变成 Na^+。这两个离子在静电力作用下结合在一起形成一个稳定的食盐分子。同样，氧原子外层缺少两个电子(原子序数＝8＝2＋6)，因此倾向于从别的原子那里俘获两个电子，因而能结合两个单价的原子（如氢、钠、钾等)，或者结合一个可提供两个电子的两价原子，如镁（原子序数＝12＝2＋8＋2)。这类化合的例子如图VII-16所示。现在我

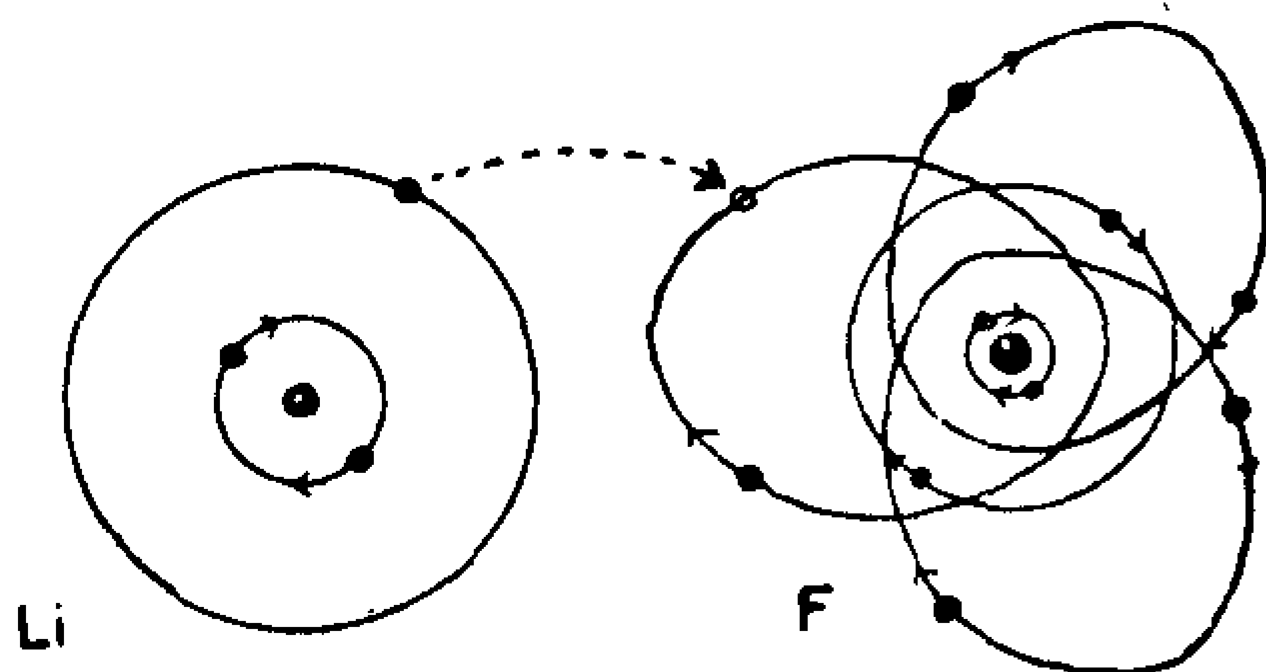


图 VII-16　锂(Li)原子和氟(F)原子在氟化锂(LiF)分子中的化学结合。Li 原子外壳层中一个单独电子跳到氟原子快满壳层中的空位上。



图 VII-17　狄拉克(左)和德布洛意

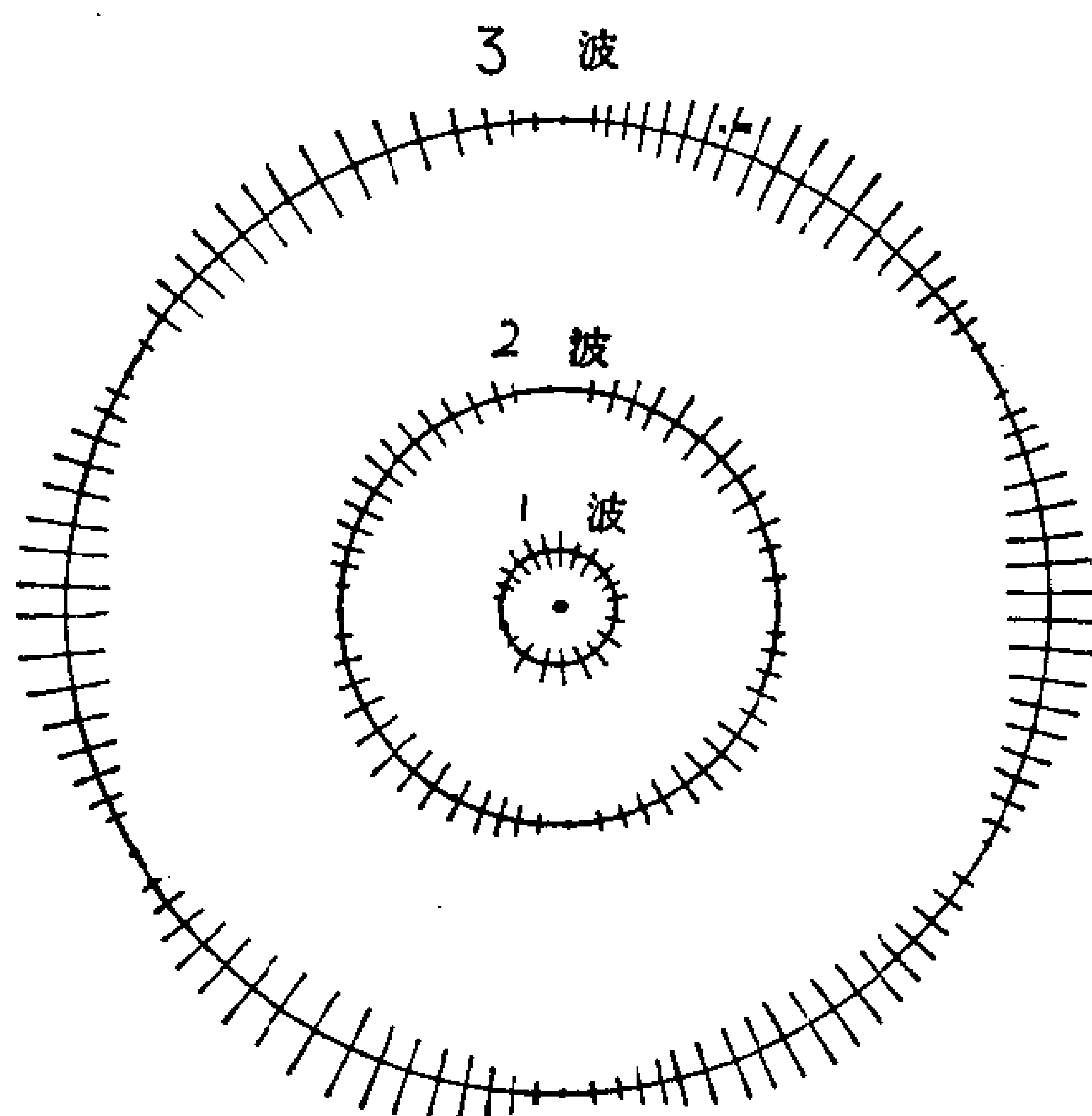


图 VII-18 沿玻尔轨道的德布洛意波

们就清楚为什么惰性气体在化学上是不活泼的了，因为它们全都是满壳层，既没有多余的电子可以提供，也不能获取别的电子。

物 质 波

1924年，一位32岁的法国贵族德布洛意〔这个名字的发音有些象“broccoli”（花甘蓝）〕（图 VII-17），向巴黎大学教授会提交了一篇博士论文，论文中提出了一些惊人的观念。他的科学生涯开始时是学习中世纪史，后来才对理论物理发生了兴趣。德布洛意认为，物质粒子的运动伴随着某种引导波，这些波跟着粒子一同在空间中传播。如果事情是这样的话，玻尔原子模型中特定的量子轨道就可以解释为满足如下条件的轨道：在这些轨道的长度中包含着整数个这种引导波。第一量子轨道中包含有一个波，第二轨道中有两个波等等(图 VII-18)。我们早先已经看到，在圆周运动的简单情况下，玻尔量子轨道所满足的条件是即它们的长度乘以运动电子的动量（质量乘速度）对第一轨道等于 h，对第二轨道等于 $2h$，对第三轨道等于 $3h$ 等等。如果我们假设引导波的波长等于 h 除以粒子的动量

$$\frac{h}{mv},$$

那么上述两种说法就变得完全相同，而德布洛意正是这样假设的。对于中间数值的半径，引导波绕圆周传播时无法“首尾相接”，因此这种运动形式不可能存在。这样，德布洛意一下子就把玻尔那些骨架式的量子轨道变成了管风琴和鼓膜之类的新概念了。粒子的量子力学从此具有了类似声波或光波的性质。

这个革命性的假设应当经受得起实验的检验。如果电子在原子内部运动时受德布洛意波的引导，则当它在空间中沿直线飞行时也必定显示一定的波动性。对于实验室中使用的几千伏特加速电压的电子束说来，德布洛意波长可望达到 10^{-8} 厘米左右，即与 X 射线的波长可相比拟，因此我们可以用 X 射线衍射的技术来检验是否有什么波在伴随着电子。

这方面的一个实验是在 1927 年由 J·J· 汤姆逊爵士的儿子乔治（后来成为乔治爵士）和美国物理学家戴维森与革末所完成的。他们让一束在电场中被加速的电子射向晶体，结果得到了一幅照片 IV（下）那样的图象，确凿无疑地表明这是一种波的衍射现象。从衍射环的直径估算出的波长，与德布洛意公式 $\frac{h}{mv}$ 所给出的波长完全一致。当束中电子的速度增大或减小时，这波长也随之减小或增大。几年后，德国物理学家斯特恩用氢分子束和氦原子束代替电子束重复了戴维森和革末的实验，证明这时也发生要用德布洛意公式来描述的衍射现象。这样，象电子或原子这类微粒在运动时受“引导波”的引导这一点就



图 VII-19　海森堡（左）和薛定锷

成为完全确定无疑的了，但是，这种波的性质当时还是完全不清楚的。

1926年，奥地利物理学家薛定锷（图VII-19）推广了德布洛意的观点并给其奠定了严格的数学基础，薛定锷把这些观点纳入了著名的薛定锷方程中，这方程适用于粒子在任何力场中的运动。在氢原子以及更复杂原子的情况下应用薛定锷方程后，得到了玻尔的量子轨道理论的全部结果。此外，它还能处理旧理论所解决不了的问题（例如谱线强度的问题）。现在不再用圆或椭圆的量子轨道来描述原子的内部情况了，而是用所谓的 ψ 函数来描述，这些函数分别对应于原子核周围空间中可能存在的各种德布洛意波。

薛定锷的第一篇论文发表在第一流的德国杂志"物理学年鉴"上，与此同时，在另一家有同样权威的杂志"物理时代"上发表了一篇关于量子理论的文章，这是一位年轻的德国物理学家（当时24岁）海森堡（图VII-19）写的。我们难以用某种通俗的方式来描述海森堡的理论。其主要思想是认为象位置、速度、力这类力学量不应当用5、$7\frac{1}{2}$ 或 $13\frac{5}{7}$ 这类普通的数字来表示，而应当用一些称为"矩阵"的抽象的数学结构来表示，每个矩阵好象一个纵横字谜的排列那样由普通的数字组成，排成一个无限的行和列的序列。我们可以给这些矩阵建立加减乘除的法则，它们与普通代数的运算法则很类似，但有一点却截然不同。在矩阵代数中，A 乘 B 的乘积不一定等于 B 乘 A 的乘积，这是由于矩阵的乘法比较复杂。和这种情况最类似的就是人的语言，在语言中，道格拉斯·马尔科姆与马尔科姆·道格拉斯并不一样，航空母舰也不等于母舰航空。现在，海森堡证明了，如果我们把经典力学方程中所有的量都看成矩阵，再引入一个附加的条件，即动量×速度－速度×动量$=hi$，其中 h 是量子常数，而 i 是我们的老朋友虚数单位 $i=\sqrt{-1}$，那

么，这样得到的结论就能正确地描述所有已知的量子现象。

这两篇论文用两种完全不同的方法得到了完全相同的结果，它们的同时发表使整个物理界都大为震惊，但是，很快就发现，两种理论在数学上是等价的。事实上，海森堡的矩阵就是把薛定锷的解排列成表，而在解决量子理论的各种问题时，我们可以交替应用波动力学和矩阵力学。

测不准关系*

引导物质粒子运动的德布洛意波的物理意义是什么呢？它们是象光波那样真实的波还是在描述微观物理现象时仅仅为了方便而引入的一种数学抽象呢？海森堡在提出波动力学的两年后回答了这个问题，他一直在研究量子理论引入了辐射能和机械能最小值后，对经典力学基本概念产生的影响如何。

海森堡找到了引起麻烦的根源，这就是企图把普通的观测法则和观测方法应用来观测原子尺度的现象。在日常经验的世界中，我们可观测任何现象并测量它的性质，而不致对被观测的现象产生显著影响。诚然，如果我们试图用一根澡盆温度表测量一小杯咖啡的温度，温度表就会从咖啡中吸收太多的热量，从而大大改变咖啡的温度。但是如果用一支小型的化学温度计，我们就可以得到足够准确的读数。用一支热容量小得几乎可以忽略不计的微小的热偶，我们可以量出一个象生命细胞那样小的物体的温度。但在原子世界里，我们就决不能忽视由于引用测量仪器而产生的干扰了。原子尺度上的能量是如此之小，以致操作最精巧的测量也会对被观测的现象产生实质性的干扰，因而不能保证测量结果

* 这段文字大体是照作者的一篇文章"测不准原理"来写的，该文发表在 1958 年 1 月份"科学的美国人"杂志上。

所实际描述的就是在测量装置不存在时所会有的情况。观测者及其仪器成了被观测现象的一个不可分割的部分。即使在原则上说，一个孤立自在的物理现象也是没有的。在任何情况下，观测者与现象之间总是存在着绝对不可避免的相互作用。

海森堡为了说明这一点，详尽地考虑了试图跟踪物质粒子运动的问题。在宏观世界中，我们可以跟踪一个乒乓球的飞行，而不致对它的轨道产生丝毫影响。我们知道光有压力作用于乒乓球上，但是我们用不着在黑屋子里打乒乓球（假定这是可能的话），因为光压太小了，不致于使球的飞行路线有丝毫变化。但要是电子而不是乒乓球，情况就完全不同了。海森堡用一个"思想实验"考查了这种情况，爱因斯坦在讨论其相对论时也是用的这种推理方法。

在这个思想实验中，实验者拥有一个"理想工场"，他在这个工场里可以造出任何一种仪器或装置，只要它的设计和功能不违反基本的物理学定律。例如，他可以造一支火箭，其运动速度接近光速，但不超过光速，他也可以使用一个只发射一个光子的光源，但不能发射半个光子。海森堡安装了一部理想的装置来观测电子的

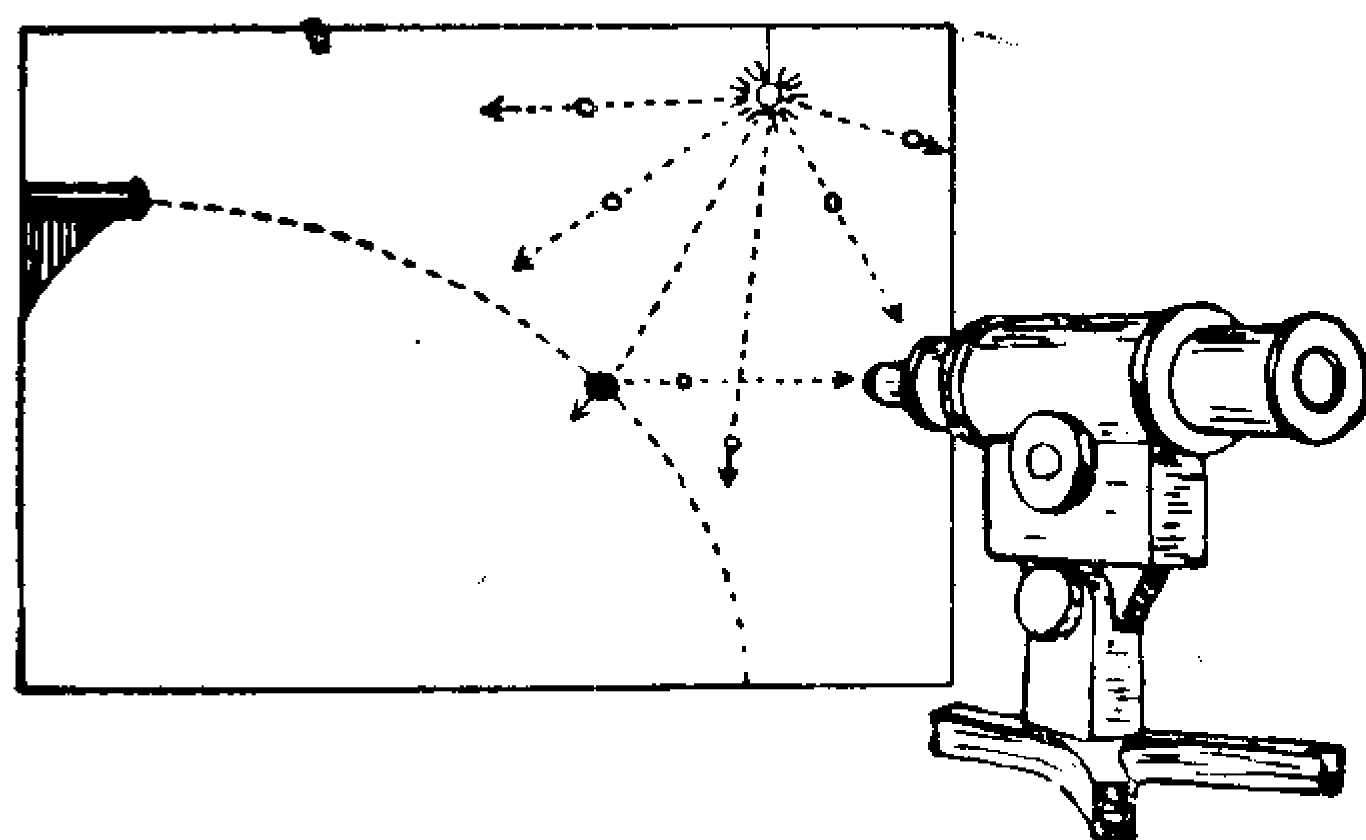


图 VII-20 海森堡观测粒子轨迹的理想实验

飞行路线（图 VII-20）。他想象有一电子枪，能在水平方向发射单个电子进入一个完全真空的室内——里面甚至连一个空气分子也没有；他的光是来自一个理想的光源，这光源可以发射具有任意波长和任意数目的光子。他还可以通过一个理想显微镜来观察电子的运动，这台显微镜在整个光谱波段——从最长的无线电波到最短的 γ 射线——内能任意加以调节。

当电子射入室内时，会发生什么情况呢？按照我们的经典力学课本，粒子应当沿着一条称为抛物线的轨迹运动。但在实际上，光子一旦击中电子，电子就会反冲而改变其速度。若是逐点观测粒子的运动，我们就会发现它由于光子的碰撞而沿一条曲折的路径运动。然而，既然我们用的是一部理想的仪器，我们当然可以用减小光子能量的办法来使碰撞程度减到最弱，我们可以用低频率的光做到这一点。事实上，在达到无限低频率的极限情况下（在我们的仪器中这是可能的），可以使光子对电子运动的干扰减到任意小。但这时又产生了新的困难。光的波长越长，由于衍射现象，我们就越不能够确定一个物体。所以在任一给定时刻，我们就不能再看到电子的准确位置了。海森堡证明了，位置和速度不确定程度的乘积绝不能小于普朗克常数除以粒子的质量，即

$$\Delta v \cdot \Delta x \geqslant \frac{h}{m}$$

这样，用很短的波我们可以精确地确定一个运动粒子的位置，但是我们将大大干扰它的速度，而用很长的波时，我们可以确定它未受干扰的速度，但是它的位置就会很不确定了。我们当然可以在这些不确定程度之间选择中间道路。如果我们随意选用某一适中的光波波长，它对粒子的轨迹就只产生适当程度的干扰，因而我们仍能以相当好的近似程度来确定它的路径（图 VII-21）。用

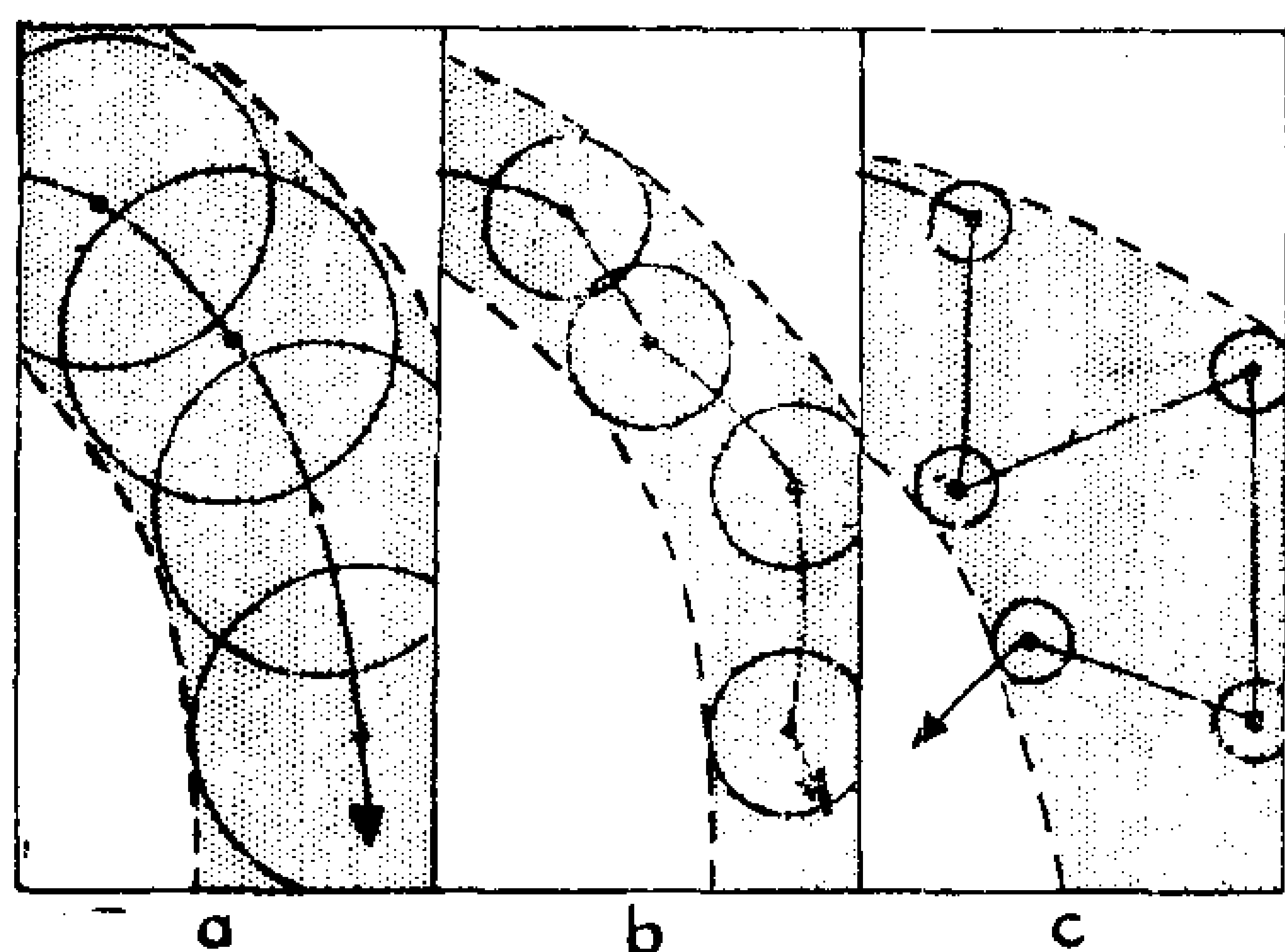


图 VII-21 海森堡的假想实验中的粒子路径。(a)光的波长太长,每次位置的测量很不准确。(b)最适宜的情况。(c)光的频率太高,粒子的反冲太厉害。

经典的语言来说，观测到的路径将不是一条细线，而是一条带子,其边界是模糊的。在诸如电视显象管的情况下，这样描出的电子轨迹不会引起什么困难，因为电子到达萤光屏上时路径的“厚度”要比电子束在屏上所形成斑点的直径小很多。这时我们满可以用一条线来表示电子的轨迹。但是我们不能用同样的说法来描述电子在原子内部的轨道。这时轨道不确定的辐度大约有轨道到原子核的距离那样宽!

假定我们放弃用光来跟踪运动粒子径迹的企图，而改用云室的方法。在我们假想的工场中，可以造一个理想的“云室”，把里面的物质粒子完全抽走，但其中充满了细小的假想的“指示物”，只要有一个电子从旁经过,它们就被激活，被激活的“指示物”会显示出运动粒子的径迹，就象一台真实的云室中的水滴的情况那样*。

经典力学会认为,原则上这些指示物是可以造得足够小的,并且可以造得足够灵敏,使它们不致从运动粒子取走显著的能量,因此我们可以以任意的精确度观测到粒子的轨迹。但是量子力学对这个办法做了根本的否定。量子力学中有一条法则：力学系统越

* 核物理学家所用的真实云室将在下一章中介绍。

小，它的能量子(能量的最小量)就越大。这样，当指示物的尺度减小时(以便更精确地测量电子的位置)，它们就会从旁边经过的粒子中取走更多的能量。情况完全类似于我们利用光跟踪粒子径迹时所遇到的那个无法克服的困难，因此我们再一次得到位置与速度的测不准度所满足的同样关系。

这一切对我们意味着什么呢？海森堡的结论是，在原子尺度上，我们必须放弃物体的轨迹是一条数学线(即无限细的线)的概念。当我们处理的是日常经验领域里的现象时，这个概念是足够精确的，这时我们可以认为运动物体好象被一条路轨限制那样保持在它的路径上。但在原子内部电子的微小世界里，个体的运动和事件不是这样可以预先断定的。象电子和光子这些物质微粒，在波的引导下是遍布在一个范围里运动，我们只能把它看成是经典力学中变宽了的线状轨迹。重要之点在于，这一引导是按照随机的方式而不是严格决定论的方式来实现的。我们只能算出一个电子将击中屏上某点的几率或是任何一个别的物质粒子将在给定一部仪器中某地被发现的几率，但是我们不能肯定地说出它在给定的力场中所通过的路径。

必须弄清楚，这里所使用的"几率"一词，其意义与我们通常在经典物理和日常生活中所理解的截然不同。当我们说在玩扑克牌中抓到清一色王牌有一定的几率时，意思只是说因为我们不知道牌的排列情况而要估计一下机会。如果已经准确地知道洗牌的过程，我们就能肯定地预言是否可以拿到清一色的王牌。经典物理学认为，象气体分子的运动这类问题也是如此：它们的行为不得不根据统计几率来描述只是因为我们的知识不完全，如果所有的粒子的位置和速度都已给定，我们就能充分详尽地预言气体内的事件。测不准原理彻底推翻了这个观念，我们之所以不能预言个别

粒子的运动，是因为我们一开始就决不可能准确地知道初始条件。在原子的尺度上同时准确地测量一个粒子的位置和速度在原则上是不可能的。

引导物质粒子运动的波函数 ψ（更确切地说是它的平方）是否是一种确定的"物理实体"，就象存在着钠原子和洲际导弹那种意义上的物理实体呢？答案就要看我们怎样理解"存在"这个词的意义了。波函数与物体的轨迹在同一意义上说是"存在"的。地球绕日运动的轨道或月球绕地球运动的轨道在数学意思上是确实存在的，它们代表着一个运动物体在空间陆续占据着一系列的点。但是按照路轨引导列车穿过田野的意义来说，它们并不存在。特别地说，波函数并没有什么质量，无非是一条模糊的轨道。

在经典物理领域中，与此最相似的也许是"熵"的概念。熵是理论物理学家创造出来的一个数学函数，它与任一给定分子运动模式的数学几率有联系，能确定热力学过程通常所进行的方向：从较小的熵值向较大熵值的方向进行。但"熵"并不是象质量和能量那样的"物理实体"，我们可以说一克物质和一克能量（因有爱因斯坦公式），可是我们要是说一克熵，那就毫无意义了。要是说一克德布洛意波或一克薛定锷函数那也是同样毫无意义的！

考察一下海森堡公式，就可以看出为什么当我们处理宏观物质时可以不考虑测不准原理而完全可以信赖旧的决定论原理。位置的测不准度与速度测不准度的乘积等于普朗克常数除以粒子的质量。普朗克常数是一个极其微小的量，其数值在厘米—克—秒制中大约只有 10^{-27}。当我们考虑重 1 毫克那样大的粒子时，原则上我们可以在 10^{-12} 厘米和每秒 10^{-12} 厘米（即每百年 30μ）的范围内同时确定它的位置和速度！

玻尔根据海森堡原理发展了一种新的物理哲学。它使我们关

于物质世界的观念发生了深刻的变化，这些观念从我们童年起就在日常经验中获得了。但是，这种新哲学却能解决原子物理中的许多难题。

许多物理学家很快就接受了新观点。另外一些人则完全不喜欢它，爱因斯坦就是其中之一。爱因斯坦关于决定论的哲学信念不允许他把测不准性上升为一个原理。正象当初有些怀疑的人企图在爱因斯坦的相对论中找到矛盾一样，爱因斯坦也试图在量子物理的测不准原理中发现矛盾。可是他的努力只是使得测不准原理的地位更加巩固了。1930年在布鲁塞尔召开的第六届国际索尔维物理学会议上发生的一件小事，可以作为说明这一点的例子。

在一次玻尔也在场的讨论中，爱因斯坦提出了一个“思想实验”。他争论说，时间是时空的第四个座标，能量是动量(质量×速度)的第四个分量，所以海森堡的测不准方程意味着时间测不准度与能量的测不准度有关，两者的乘积至少等于普朗克常数。爱因斯坦决定去证明情况并非如此——即证明时间和能量可以同时确定而毫无不确定性。他说，如果考虑一个理想的盒子，盒子是用一些理想的镜面镶成，能够无限期地保持住辐射能量。我们称一下盒子的重量，然后经过一定的时间，在某个选定的时刻有一个类似于定时炸弹中那样的定时钟表装置把一个理想的光闸打开，放出一些光。现在我们再称一下盒子的重量，由质量的变化就可以知道放出光的能量。这样，爱因斯坦说，我们就可以以任意精确程度测出放出光的能量和放光的时间，因而对测不准原理有矛盾。

第二天早上，经过一个不眠之夜，玻尔对爱因斯坦的反证给予了致命的打击。玻尔提出了一个相反的思想实验，用的是他自己的理想仪器(作为玻尔的学生，作者后来真地用木头和金属做成了

这个仪器,以供玻尔讲演这个问题使用，图 VII-22)。玻尔抨击了

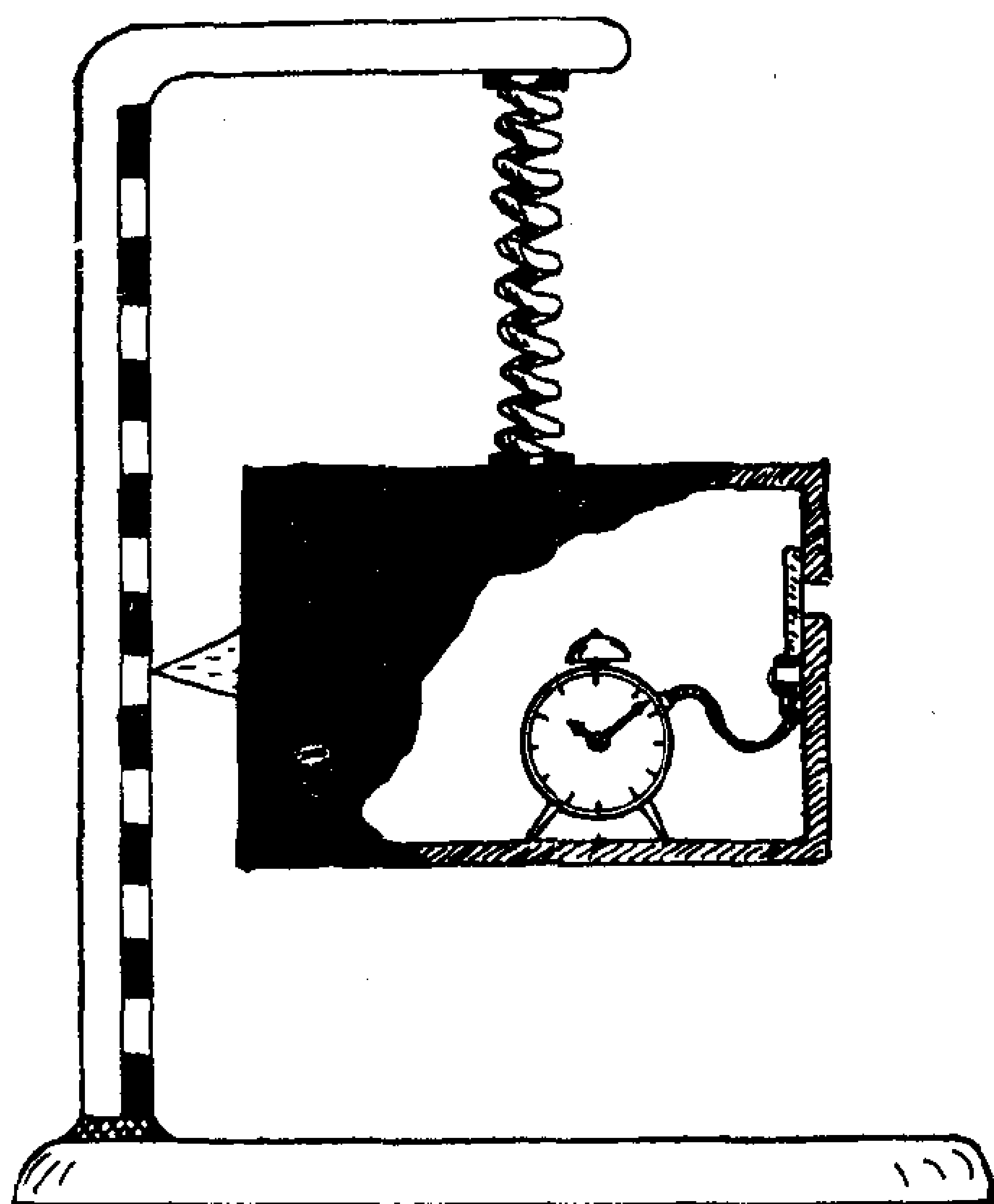


图 VII-22 测量光重的爱因斯坦-玻尔秤。

给爱因斯坦盒子称重的问题。他说，用一个装着指针的弹簧秤，就可以很好地把指针在附近一根垂直杆子上指示的重量记录下来。但是玻尔指出，因为盒子改变重量时要在垂直方向运动，所以它的垂直速度就会有一测不准度，因而盒子离桌面的高度也就有一测不准度。而且，它在地球表面上高度的测不准度又会使时钟的速率有一测不准度,因为根据相对论,时钟的速率依赖于它在引力场中的位置。玻尔进一步证明了，时间的测不准度和盒子质量变化的测不准度之间确实具有爱因斯坦所企图推翻的那种关系。

爱因斯坦上了自己论据的当，不得不承认玻尔-海森堡的概念并不存在内在矛盾。但是直到他生命的最后时刻，他还在拒绝

接受测不准原理，仍然满怀希望物理学终有一天会回到决定论的观点上来。

虚无之中的空穴

狄拉克(图 VII-17)在二十年代初获得电气工程学位后，马上就发现自己失业了。他找不到工作，便向剑桥大学毕业同学会求援,同学会接受了他的申请。将近十年后,由于他在量子力学方面的重要贡献，他获得了诺贝尔物理学奖金。狄拉克过去和现在一直是一位“象牙之塔”式的科学家，当他总是快乐地与同事们聊天,谈他自己到东洋所犯的过失或是别的什么普通话题时,都还是继续在进行自己的研究。但他在科学会议上的发言却常常是尖锐而切中要害的。有一次,在哥本哈根举行理论物理会议期间,他在听一位日本物理学家西名的发言,黑板上写满了算式,最后得到了一个关于短波辐射被自由电子散射的重要公式。狄拉克曾提醒西名注意一点,就是他在黑板上最后导出的公式中,括号里的第三项有一负号，而在原稿中这一项却是正的。“是的，”西名回答说，“原稿中那样是对的，我现在在黑板上推导这个公式时，一定是在某个地方弄错了符号。”狄拉克纠正道，“在奇数个地方弄错了符号。”确实，符号错了三次、五次、七次等等都会带来同样结果。

一次,狄拉克在多伦多大学演讲后让大家提问题时,听众中有一位加拿大教授举手问道:“狄拉克博士，我不明白你是怎样导出黑板左上角那个公式的。”“你这是在叙述一个问题，而不是提问题,”狄拉克答道,“请问下一个问题吧!”

他对一个智力测验所做的不寻常的解答，充分显示了他的才思是何等敏捷。狄拉克在访问哥廷根大学时，学校里的数学家和

物理学家正在研究一个难题。题目是这样的：用所有可以利用的代数符号如加、减、乘方、开方等等写出所有从1到100之间的数，但只能用四个2来写。例如，1可以写成$\frac{2\times2}{2\times2}$，2可以写成$\frac{2}{2}+\frac{2}{2}$，3和5写成$2^2-\frac{2}{2}$，$2^2+\frac{2}{2}$，7写成$\frac{2}{0.2\times2}+2$……

狄拉克拿到这个题目后，很快就找到了只用3个2写出任何数的通解。这个解是：

$$N=-\log_2\log_2\sqrt{\sqrt{\sqrt{\sqrt{2}}}}$$

其中根号的数目等于给定的数N。懂得一点代数的人都知道上式的证明是十分明显的。

但是在他所有的重要数学发现中，他最感到骄傲的一个发现却没有给他的名气带来什么好处。有一次他与一位教授太太闲谈时，在留心观察她编织着一条围巾或是别的什么东西。回去后他就研究，试图在脑海里重现这位太太手里织针的飞快动作，并且得出结论，还有另外一种可能的用针办法。他急忙回来讲他的发现，结果失望地发现，“正织”和“倒织”这两种方法几百年来早就为妇女们所熟知了。

狄拉克尽管在拓扑学领域里错过了一个重要发现，但对相对论性量子理论领域却有很大的贡献。当时波动力学还只有几年的历史，起初是由薛定锷在非相对论性运动的情况下建立起来的，亦即适用于速度与光速相比很小的粒子运动，而理论物理学家们则竭力想把相对论和量子论这两大理论结合起来。薛定锷方程把电子看成是一点，而把它应用于具有小磁石性质的自旋电子的所有尝试都没有导致到什么令人满意的结果。

狄拉克在1930年发表的一篇著名论文中，提出了一个新的方程，现在称之为“狄拉克方程”，它起了一箭双雕的作用。这个方程

满足相对论所有的要求，适用于运动速度不论多快的电子，同时，自然地导致电子的行为必定象一个个微小的磁化的自旋陀螺的结论。狄拉克的相对论性波方程在这里讨论起来太复杂了，但是读者们满可以相信它是完全正确的。

狄拉克方程虽然是好，但正是因为它如此成功地把相对论与量子论统一了起来，所以立刻便导致了很大的麻烦。产生麻烦的原因是由于这样一个事实(我们在第六章中没有讨论它)：相对论性力学在数学上表明可能存在两种不同的世界，一个是我们生活在其中的"正世界"，另一个是只能要求我们想象的奇怪的"负世界"。在这个"负"世界里，所有的物体都具有负质量，意思就是说，当我们推它一下，它便开始向相反方向运动。由于明显的类似，我们可以把这种具有负质量的电子称为"哈哈电子"。在这种负质量的世界里将会发生一些很奇怪的事情。要使一个物体向前运动，我们就得把它向后拉，而要让它停止我们就要把它向前推。试考虑两个位置彼此接近的静止电子。由于电子的电荷，它们之间便有斥力。如果这两个电子是"普通的"电子，这个斥力将使它们向相反方向加速运动而高速地飞开。但是，如果其中有一个是"哈哈电子"，这个排斥力就会使它向着另一电子运动，而后者则飞离它。因为两者加速度的数值相等，所以它们将以不断增大的速度飞跑，"哈哈电子"一直在追赶着普通的电子。但这与能量守恒定律并没有矛盾。普通电子的动能是 $\frac{1}{2}mv^2$，而哈哈电子的动能是 $-\frac{1}{2}mv^2$。因此系统的总能量是 $\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv^2=0$，即正好等于它们静止时的能量。

从来没有人见到过哈哈电子、哈哈石头或哈哈行星，这只是爱因斯坦力学方程的一个虚构的附加解。在狄拉克统一相对论和量

子论以前，并没有什么引起麻烦的事情。事实上，一个静止的普通电子具有能量 m_0c^2，当它以速度 v 运动时，还必须加上它的动能。但是一个哈哈电子的静止能量是 $-m_0c^2$，它在运动时将产生附加的负动能。因此，这两种电子的能量图看起来便如图 VII-23 所示。该图分为两个部分，上部是普通电子的，下部是哈哈电子的，这两部分由 m_0c^2 和 $-m_0c^2$ 之间的一个间隙隔开，间隙中不对应任何一种可能的运动。因此，如果粒子运动是连续的，它就无法从图的上部运动到下部来，所以我们就可以绕开这个困难，而只要简单地说："我们的电子都是行为正常的正质量的粒子，关于数学上存在的另一种可能性并不碍事！"

但是，如果把相对论和量子论联系起来，我们要摆脱困难就那么容易了。事实上，根据量子理论电子只爱从一个能级跳到另一能级，尽管在这两个运动状态之间并没有连续的过渡。如果电子可以从一个玻尔轨道跳到另一玻尔轨道，同时以光量子的形式发射其能量，那么它们为什么不能从图 VII-23 中上边的能级跳到下边来呢？但要这是可能的话，每一个正常的电子也都会跳下来，进入负能量的哈哈电子群中，结果由于辐射损失掉的能量越大，它运动得就越快，并获得负的动能……这当然是不会发生的，但是为什么呢？

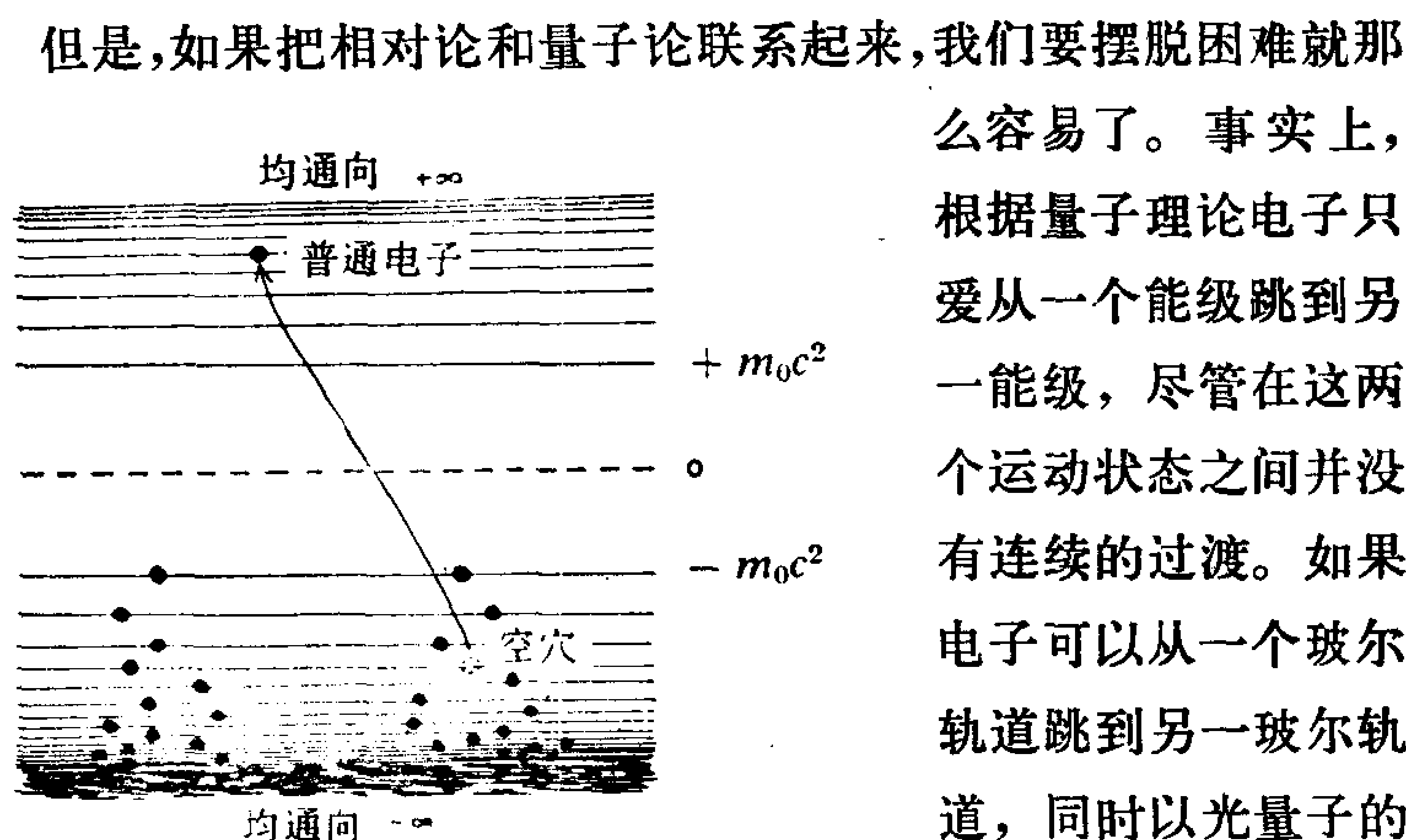


图 VII-23 狄拉克的"哈哈电子"海表明了电子对（一正一负）的形式

狄拉克解决这个困难的唯一办法，就是假设所有的负能态都被哈哈电子占满了，因此根据泡利不相容原理，正能态的电子是被禁止到下边来的。当然，这就意味着真空不再是真空，而是被填满了哈哈电子，它们在所有可能的方向运动，具有各种可能的速度！事实上，真空每单位体积中必须包含有无限多个这种自我矛盾的粒子！为什么我们从来没有注意到他们呢？狄拉克的解释就更难理解了。试想一条深水鱼，它从来没有到洋面来过，所以也不知道在它上面某个地方就是水的尽头。如果这条鱼有足够的智力，能推测它的周围情况，它甚至会把水不看成是一种“介质”，而把它当成“自由空间”。同样可以论证说，物理学家之所以没有发觉这个无限密集的哈哈电子群，是因为它们在空间是完全均匀分布的。当然，这个想法颇有旧式宇宙以太的味道，但它还是值得研究的。如果回到我们那条有智力的深水鱼，我们可以想象它观察到啤酒瓶子、别的什么废料乃至整个船只沉到海底后，于是就会形成引力的概念。但要是有一天，陷在沉船舱里的一些空气放了出来，我们这条聪明的鱼就可看到有一连串闪闪发光的气泡向上升到海面了。这条鱼当然会感到非常惊奇，但想一想之后，它就会得出结论说，这些闪闪发光的球一定具有负的质量。要不然，当重力把任何东西都向下拉的时候，它们怎么可能是向上运动呢？

好，狄拉克对于他那填满了负能态电子的海洋也有着类似的想法。假定狄拉克海中有一个气泡，就是说，有一个“哈哈电子”丢失了。物理学家对此会有怎样的感觉呢？因为缺少一个负电荷等于增加一个正电荷，所以他会把它看成是一个带正电的粒子。而且，根据气泡的比喻，质量的符号也要反过来，负质量的缺少也可看成是正质量的增加。狄拉克海中的这个气泡有没有可能只是普通的质子呢？这倒是个很好的想法，但是不对。狄拉克曾企图根

据哈哈电子之间的相互作用所产生的高粘滞性，来解释质量大得多的“可能是质子”的气泡，但是失败了。带正电的气泡粒子的质量总是顽固地表明它恰好等于一个普通电子的质量。泡利的计算增加了困难，他证明了，如果狄拉克海中的气泡真的是质子，氢原子那怕在极其短暂的时间内也不可能存在。的确，如果氢原子是“一个水滴绕着一个气泡旋转”的话，这个水滴就会落到气泡里并填满气泡里的空间，氢原子就会在一瞬之间消失了。关于这一点，泡利提出了所谓“第二泡利原理”，根据这个原理，理论物理学家提出的任何新观念立即能适用于他身体中所有的原子。根据这个原理，狄拉克的身体在他想出那个观念之后瞬息之间就会消失，其它理论物理学家也就无从听到这个观念了……

1931 年，美国物理学家安德尔森研究了宇宙射线簇射中高能电子在云室中产生的径迹。为了测量这些电子的速度，他把云室放在一个强磁场中，他感到大为惊奇的是，照片显示出有一半的电子向一个方向偏转，而另一半向相反的方向偏转。因此这是 50% 带正电和 50% 带负电的电子的混合，并且两种电子具有相同的质量。那些狄拉克海中的空穴，过去被错当成了质子，现在以其本来的面目出现了。这些带正电的电子常被称为**正电子**，用它所做的实验很快就证实了基于狄拉克空穴理论作出的全部预言。在高能光量子（γ 射线或宇宙射线）与原子核的碰撞下可以产生一对正负电子，这些事件的几率完全符合根据狄拉克理论算出的数值。正电子在飞过普通的物质与普通的电子碰撞时，可以看到它们被“湮灭”了，与它们的质量相当的能量便以高能光子的形式释放出来。事实上每一个细节都与预言完全符合。

但是，把正电子看成是无限密集分布的负质量电子的空穴这种奇怪的理论又如何呢？当然，理论是理论，不管我们是否喜欢

它，都要通过它与实验事实是否符合来鉴别。自狄拉克原来的论文发表以后已经证明了，事实上，并没有必要假设存在着无穷密集的负质量的电子海，为了所有实际的目的，我们都可以把正电子看成是绝对真空中的空穴。

反　物　质

发现正电子以后，物理学家便幻想有可能存在负质子，它们与普通正质子的关系就好象是正电子与电子的关系一样。但因为质子几乎比电子重两千倍，所以要产生负质子需要达到几十亿电子伏特的能量。这就开始了一系列建造粒子加速器的宏伟设计，以便能够给核弹提供这样大的能量*。在美国就有两个这种超级加速器奠了基：一是伯克利加利福尼亚大学辐射实验室的高能质子同步稳相加速器，一是纽约长岛布鲁凯文国家实验室的高能同步稳相加速器。在这场竞赛中，西海岸的物理学家西格雷、查姆伯兰等人赢得了胜利，他们在 1955 年 10 月宣布，在 62 亿电子伏特的原子射弹轰击下，他们观察到了从靶中发射出的负质子。

观测靶子被轰击时形成负质子的主要困难在于，这些质子必然伴随着千千万万个别的粒子(重介子)，它们也是在碰撞中形成的。因此必须把负质子过滤出来，与所有同它一起产生的别的粒子分开。借助一种复杂的由磁场、狭缝等等构成的“迷宫”法就可达到这个目的，只有那些具有预期性质的反质子才能通过“迷宫”。当靶中(靶子位于高能质子同步稳相加速器轰击粒子束的路径上)发出的大量粒子通过“迷宫”时，只有负质子能穿过它到达另一端。机器开始工作时，四位实验人员喜悦地观测到有些快速粒子从机器后部出口处穿出来了，大约每六分钟穿出一个。进一步的试验

* 参看第八章中“第一次核裂变”一节。

表明，这些粒子就是真正的负质子，它们是用高能粒子束轰击靶子时产生的。后来查明，它们的质量值等于1840个电子的质量，我们知道，这也就是普通正质子的质量。

正如人工产生的正电子在通过含有大量普通负电子的物质时会湮灭一样，可以预料负质子在与原子核发生碰撞而遭遇到其中的正质子时也会湮灭掉。因为在质子一反质子湮灭过程中涉及的能量大约要超过电子一反电子碰撞时所涉及能量的两千倍，所以前一湮灭过程进行时要剧烈得多，会发射许多粒子形成所谓“星射”。

负质子存在的证明，是人们关于物质性质的理论预言得到实验证实的光辉范例，尽管这个理论在刚提出的时候似乎是完全不可置信的。接着，1956年秋又发现了**反中子**，亦即这些粒子与普通中子的关系正象负质子与正质子的关系一样。因为中子没有电荷，所以中子和反中子之间的差别只能根据它们互相湮灭的能力看出来。

质子、中子和电子可以构成普通的物质原子，既然它们能以反态的形式存在，故可设想这些反粒子可以构成反物质。反物质的物理性质和化学性质全部应当与普通物质相同。要说明两块石头彼此是否成反物质关系的唯一办法就是把它们放在一起。如果放在一起后没有什么变化，它们就是同种的物质，如果它们在猛烈的爆发中湮灭了，它们就是“相反的物质”。

反物质存在的可能性给天文学和宇宙学提出了一些严重的问题。宇宙中所有的物质都是同一种的，还是有些物质和反物质的碎块无规则地散布在无限空间中呢？某些有力的论据表明，我们银河系里的物质是同一种的。事实上，如果不是这样的话，星球和散布在星际间的物质之间的湮灭过程就会产生强烈的可以观测到

的辐射。但是空间中我们的近邻大仙女座星云以及帕洛马山天文台 200 英寸望远镜的视野内散布在空间中的千万个别的星系，是由同一种物质构成的，还是正反物质各占一半呢？如果宇宙中所有的物质都是同一种的，那又是为什么呢？此外，如果有一部分是普通的物质，一部分是反物质，这两个相互排斥的部分是怎样分开的呢？对这些问题我们完全没有答案，只能希望后辈的物理学家和天文学家将来能解开这个谜了。

量子统计

运动的量子理论沉重地打击了本书第四章中讨论到的热的分

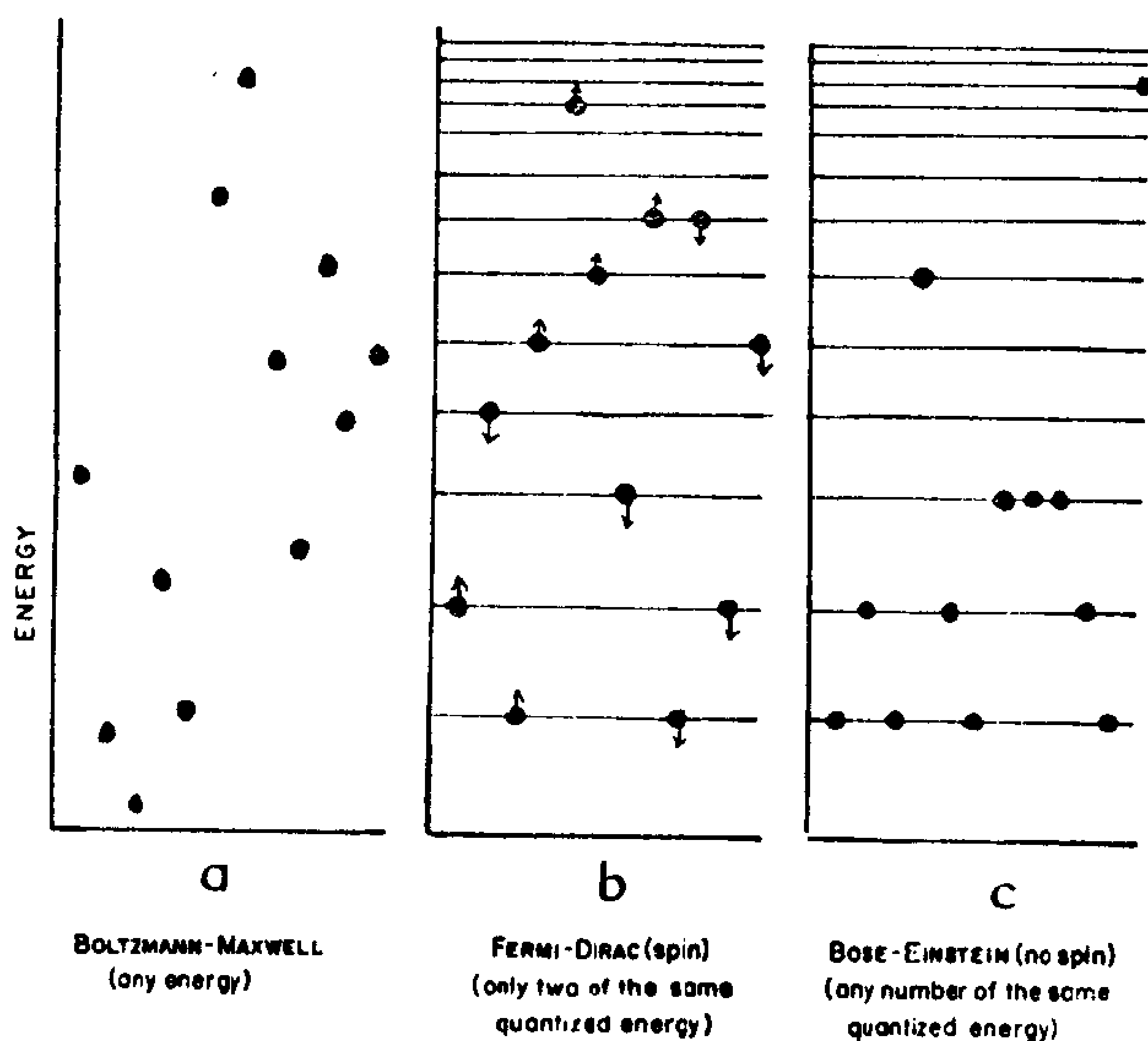


图 VII-24　十二个气体分子能量的三种统计处理方法 a）玻尔兹曼-麦克斯韦统计（能量是任意的）。b）费米-狄拉克统计（有自旋）统计（一个量子能级上只有两个粒子）。c）玻色-爱因斯坦统计（一个量子能级上可以有任意多个粒子）。

子运动论。确实，如果在原子中运动的电子只能具有某些分立数值的动能，那么同样的结论也必须适用于在一个封闭容器中运动的气体分子。这样，当我们考虑气体分子之间的能量分布时，我们就不再能假设气体分子可以具有任意的动能（图 VII-24a），就象玻尔兹曼、麦克斯韦和吉布斯等人所建立起来的经典理论那样。相反，分子所占据的应当是一些确定的量子能级，它们由容器的大小决定，这些能级之间的能量是不能容许的。由于某些粒子（如电子）遵从泡利原理，禁止两个以上的粒子占据同一量子能级，而另一些粒子（如空气分子）不受这个限制，情况就变得复杂了。这导致两种不同的统计方法：一种是所谓的费米-狄拉克统计，适用于遵从泡利原理的粒子；另一种是玻色-爱因斯坦统计，适用于不遵从泡利原理的粒子。图 VII-24 中的 b 和 c 说明了这两种统计方法的区别。量子统计的整个发展是十分令人振奋的，但是不用“专业”术语来解释它则是极其困难的。

因此，我们在这里只能说，这两种新的统计方法与旧的、在所有日常的诸如大气分子的情况下都很好的统计方法实际上没有什么差别。只有在诸如金属中的电子气和所谓“白矮”星这类遵从费米-狄拉克统计以及在温度接近绝对零度的普通气体这类遵从玻色-爱因斯坦统计的情况下，才可以指望并观测到它们与经典统计之间的偏差。我们希望对这个问题充分着迷的本书读者将以更先进的方法来研究现代物理。这样只要研究几年之后，就可以把量子统计的问题弄得一清二楚，明如水晶了。

第八章　原子核和基本粒子

放射性的发现

早在 1896 年,法国物理学家贝克勒尔在听到伦琴关于 X 射线的最新发现后，就决定研究一下萤光物质是否也能发出类似于 X 射线的东西，当时已经知道萤光物质在入射光的作用下是会发光的。他选择了一种称为硫酸双氧铀钾晶体(铀和钾的重硫酸盐)来做这些研究,他过去研究过这种物质,它表现有很强的萤光性。因为贝克勒尔认为辐射是外部照射的结果，所以他就把这种晶体放在一张照相底片上,底片用黑纸包好,然后把它放在窗台上。经过几个小时的阳光照射后,他洗出了底片,在放过硫酸双氧铀钾晶体的地方,底片明显地显示出一块浅黑的斑。他多次重复了实验,浅黑斑总是出现,甚至用很多黑纸把底片包起来,结果也是如此。

1896 年 2 月 26 和 27 日，巴黎的天空布满了乌云，雨下个不停，林荫道上的人们都躲到咖啡馆和酒店的遮篷下面去了。郁郁不欢的贝克勒尔教授把刚包好的照相底片连同放在上面的铀矿晶体一起放进写字台的抽屉里，等待好天气。太阳直到 3 月 1 日才露面,还常常被浮云遮住,时隐时现。尽管如此,贝克勒尔还是把他的新发明再放到太阳光下照射,随后又到暗室里去检查结果。结果有些难以令人置信，在放过铀盐晶体的地方，不再是早先在强太阳光下整日照射时所得到的浅黑斑，而是一块木炭一样黑的黑斑！显然,底片变黑与太阳光下对铀盐晶体的照射无关,当底片和放在上面的铀盐晶体一起摆在贝克勒尔关着的书桌里时，底片变

黑的过程是一直在不间断地进行着的。

这是类似于X射线的一种有穿透力的辐射，但它是从原子本身发出的，与任何外界的激发无关，也许这些原子就是贝克勒尔晶体中的铀原子。贝克勒尔试着把这种晶体加热、冰冻、研成粉末、把它溶解在酸里，一切能够想到的都做到了，但这种神秘辐射的强度仍然保持不变。事情很清楚，这是物质的一种新性质，称为放射性，它与原子结合起来的物理方法或化学方法无关，乃是深藏在原子本身之中的一种性质。

放射性元素

在发现放射性之后的最初几年里，许多化学家和物理学家都忙着研究这个新现象。在波兰出生的玛丽·斯克罗多夫斯卡·居里夫人是学化学的，是法国物理学家皮埃尔·居里的妻子。他对所有的化学元素及其化合物的放射性曾做过大量试验，结果发现钍也象铀那样发射同样的射线。她比较了铀矿石与金属铀的放射性，注意到铀矿石的放射性比我们根据它所含的铀所应预期的放射性几乎要强五倍。这表明矿石中一定还含有少量其它的放射性物质，其放射性比铀本身要强得多。但要把它们分离出来，则需要极大量昂贵的铀矿石。居里夫人后来从奥地利政府那里得到了一吨废矿渣（当时是毫无价值的），那是从国家生产铀的一家工厂弄来的，该厂位于乔齐姆查尔市（波希米亚），工厂把铀提取出来后，剩下的矿渣仍然保留着很强的放射性。在穿透辐射这条提修斯*线索的引导下，居里夫人设法分离出了一种物质，其化学性质类似于铋，为了纪念她的祖国，她把它叫做钋。她又继续工作，分离出另一种物质，化学性质与钡类似，并将其取名为镭，镭的放射性比

* 译注：希腊神话中杀死人身牛头怪物 Minotaur 的英雄。

铀要大二百万倍。

无论是在未开垦的荒野上还是在新的科学领域中，拓荒者在前进的道路上都可能遇到潜在的危险而成为受害者。居里夫人在六十七岁时由于患白血球增多症而去世了，现在已经知道这种疾病是由于穿透辐射的照射而引起的。当物理学家更好地懂得了如何防御辐射时，曾把一些照相底片夹在居里夫人实验室的书页里，洗出来的底片显示出了大量的指印，这是放射性物质附着在居里夫人的手指摸过的书页上引起的。

钋和镭发现之后，接着又发现了越来越多的放射性物质。其中有锕，与可裂变的铀很相近，是由德比恩和吉塞尔分离出来的，还有射钍和介钍，它们是由哈恩分离出来的，哈恩大约在四十年后又发现了铀的裂变现象。

放射性家族

在物理解释方面，研究穿透辐射性质的工作不断取得了进展。1899 年，28 岁的卢瑟福发现有三种不同的射线：

1) α 射线，用一张纸就可以挡住 α 射线，已证明它们是氦离子。(实际上是氦原子核，但卢瑟福直到十二年以后做了散射实验时〔参看第 213 页〕才知道这一点。)

2) β 射线，它可以穿过几毫米厚的铝板，后来证明它们是高速运动的电子流。

3) γ 射线，可以穿透厚达许多厘米的铅板，类似于 X 射线，但其波长更短。

人们常在物理教科书中(包括作者早先写的在内)复制一张类似图 VIII-1 的图片，它表明了 α、β 和 γ 射线通过磁场(或电场)时偏折的情况。α 射线向左偏(带正电)，β 射线向右偏(带负电)，而

γ 射线不偏折(电磁波)。但值得怀疑的是，这一实验在关于放射性的早期研究中从来没有做过（α 粒子要发生显著偏转需要极强的电磁体，而这是在很久以后才做出来的)，α 与 β 射线之间的区别是用更复杂得多的间接方法发现的。

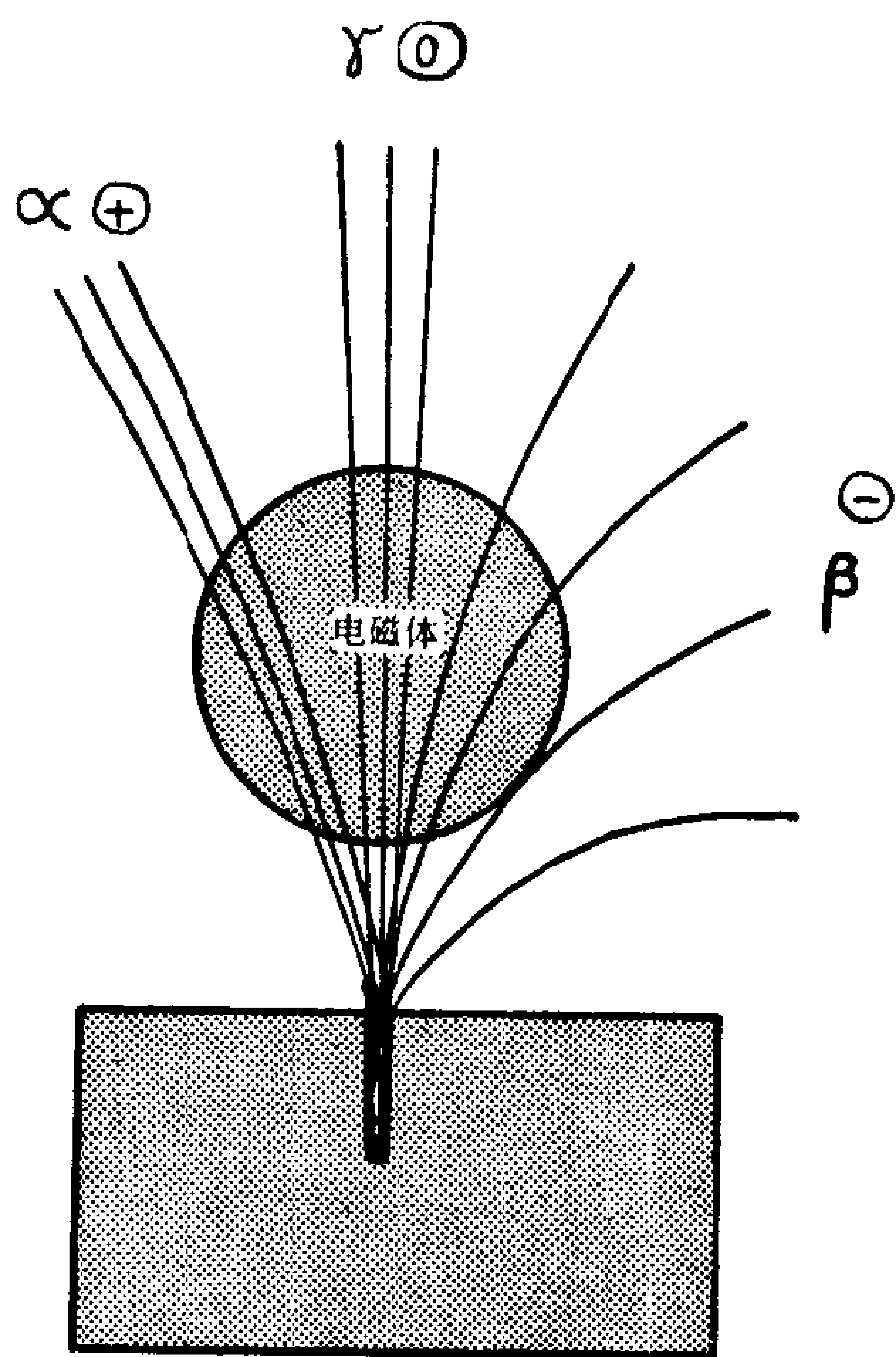


图 VIII-1 α、β 和 γ 射线

卢瑟福及其合作者弗雷德里克在他们事业的早期就得出了结论，认为放射性现象是一种化学元素自发地转变为另一种元素的结果。一个 α 粒子的电荷为 2，质量为 4，发射 α 粒子后所形成的元素，其位置将在门捷列夫周期表中向左移两格，原子量小 4 个单位；发射一个 β 粒子(负电子)使元素在门氏周期表中向右移一格，但其原子量不变；γ 射线的发射只是由于原子放出带正电或带负电的粒子而产生扰动的结果。

一系列连接不断的 α 衰变和 β 衰变，使得重的不稳定的放射性元素的原子降级，其原子序数和原子量不断减小，最后达到稳定状态，那就是铅原子。因为 α 衰变使原子量减小四个单位，而 β 衰变完全不改变原子量，所以可以有四族放射性元素。

(1) 原子量等于 4 的整数倍的 $4n$ 的元素。

（2）原子量等于 $4n+1$ 的元素。

（3）原子量等于 $4n+2$ 的元素。

（4）原子量等于 $4n+3$ 的元素。

铀的原子量是 238，即 $4\times59+2$。因此，铀以及由 α 衰变和 β 衰变得出的它的家族中的所有成员属于上述四类中的第三类。钍的原子量是 232，即 4×58，所以钍族属于第一类。衰变为锕及锕族其它成员的镤，原子量是 231，即 $4\times59+3$，因此属于第四类。原子量为 $4n+1$ 的放射性族（第二类）在自然界中是不存在的，但在原子反应堆中可以人工产生。

通过早期研究放射性的人们的艰苦努力，建立起来了现有放射性家族的家谱。266 页上表示铀族的衰变图，开头是老祖宗铀—238，经过八次 α 衰变和六次 β 衰变后，最后变成了稳定的铅—206。

每个放射性元素名称上面的两个数字是它们的原子序数和原子量，下面的数字是其半衰期，以年（y）、日（d）、小时（h）、分（m）或秒（s）为单位。对钍族、镤族或人工产生的第二族（无名）也可以作出这样的衰变图来。

生存规律

如果考查一下同一天出生的大量婴儿、小狗、小鸭子或任何其它种动物的生命史，就可发现它们并非也在同一天死亡。其中有的活得长，有的活得短一些，如果把在某一天还活着的个体的百分比画出图来，就可以得到一条如图 VIII-2a 所示的典型的生存曲线。它表明存在某一个确定的“预期寿命”，如图所示，这个预期寿命对人大约是 75 年，对狗是 15 年，对鸭子只有几年。曲线表明，在某一年龄之前早就死去的可能性是比较小的，一直活到这个年

							90–234 UX 1 245d	92–238 U I 4.5×10^{9}y
							91–234 UX 2 11m	
		82–214 RaB 27m	84–218 RaA 3m	86–222 Rn 3.8d	88–226 Ra 1,590y	90–230 Io 8.3×10^{4}y	92–234 U II 2.7×10^{5}y	
	81–210 RaC″ 13m	83–214 RaC 20m	β		α 衰变			
	82–210 RaD 22y	84–214 RaC′ 10^{-4}s	衰 变					
	83–210 RaE 50d							
82–206 Pb 稳定	84–210 Po 137d							

龄之后很久的可能性也是相当小的。

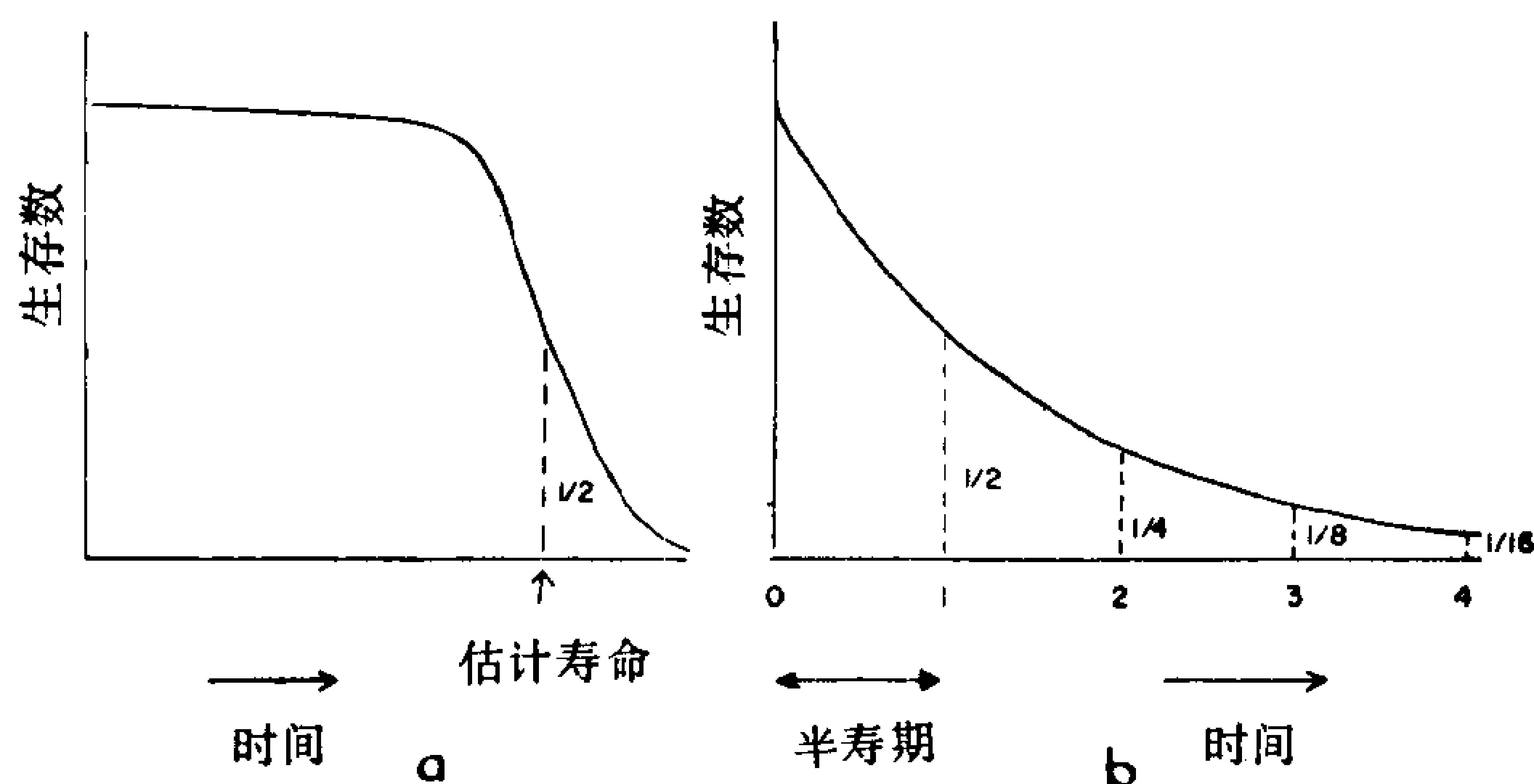


图　VIII-2 动物和原子核的生存曲线

对放射性原子来说，情况就完全不同了，由于一个放射性家族的先辈成员要转变为下一个成员（或者通过 α 衰变或者通过 β 衰变），所以新形成一个成员的机会与它形成以后所经过的时间是长短没有关系的。这就好比士兵们与敌人不断战斗时所遇到的情况，战争中每天都有一定比例的人数伤亡，因此无法说出明天的人数有多少。在这情况下，我们就不能说什么“预期寿命”了，而必须引入一个很不相同的概念，叫做“半寿期”*，即在这段时期内，将有一半的士兵被杀死，或者有一半不稳定的放射性原子将要衰变。表示这一过程的曲线如图 VIII-2 b 所示，它在数学上叫做指数曲线。不同的放射性元素有着很不相同的半寿期。铀在四百五十万年的时间内衰变 50%，镭是 1590 年，而对 RaC′ 来说，仅在万分之一秒的时间内就有半数的原子解体了。三个天然放射性家族之所以存在，是由于它们的祖先铀 I（或 $_{92}U^{238}$）、钍（1.3×10^{10} 年）以及镤的

* 译注：亦做半衰期，下同。

“爷爷”(5×10^8年)*的半寿期特别长，可与宇宙的年龄相比。

自然界中不存在($4n+1$)型的放射性族是因为人们发现这些原子核在原子反应堆中人工生成后，其第一代的半寿期很短，所以这个放射性族在很久以前就一定已经全部衰变完了。

势垒的穿透

关于α衰变缓慢性的解释，是由本书作者（当时正在德国工作）和格尼（澳大利亚）与康登（美国）小组分别独立地提出的，其依据是波动力学。大家知道，原子核周围被一座电力形成的高垒所包围，这首先是在卢瑟福关于α粒子的散射实验中研究的。当α粒子接近原子核时，它要受到一排斥力，此力与核电荷(Ze)和α粒子的电荷($2e$)的乘积成正比，而与它们之间的距离平方成反比。当α粒子与原子核发生接触时，它与形成核的粒子之间的凝聚力便把它拉进核内，并将它紧吸在核内。对于这两种力的势曲线如图VIII-3所示，象是一个壁垒，其里边是一陡峭的壁，外面是缓慢变化的斜坡。入射的α粒子要进入原子核，必须爬过这势垒的顶部，然后才落入核内。同样，粒子要离开核时，也必须爬过势垒的内壁，然后沿着它外面的斜坡滚下来。卢瑟福研究了α粒子对铀的散射，发现这种元素的原子核周围的势垒高度至少必须是14×10^{-6}尔格，因为从RaC′中发出并具有这一能量的快速α粒子没有显示出任何迹象能到达势垒顶部。另一方面，铀本身所发出的α粒子只有8×10^{-6}尔格的能量。射出的粒子具有这样小的能量，怎么

* 镤本身的半寿期只有12000年，但通过一次α衰变和一次β衰变生成镤的锕族先辈的半寿期却有5亿年。它在锕系中没有名字，但它是铀的同位素，所以只称为U-235。$_{92}U^{235}$放出一个α粒子后变为$_{90}UY^{231}$，再经过一次β衰变变为$_{91}Pa^{231}$。U-235起了个铀族的名字，但实际上属于锕族〔($4n+3$)类〕。它就是使“原子”弹和核反应堆的发展成为可能的“可裂变”铀。

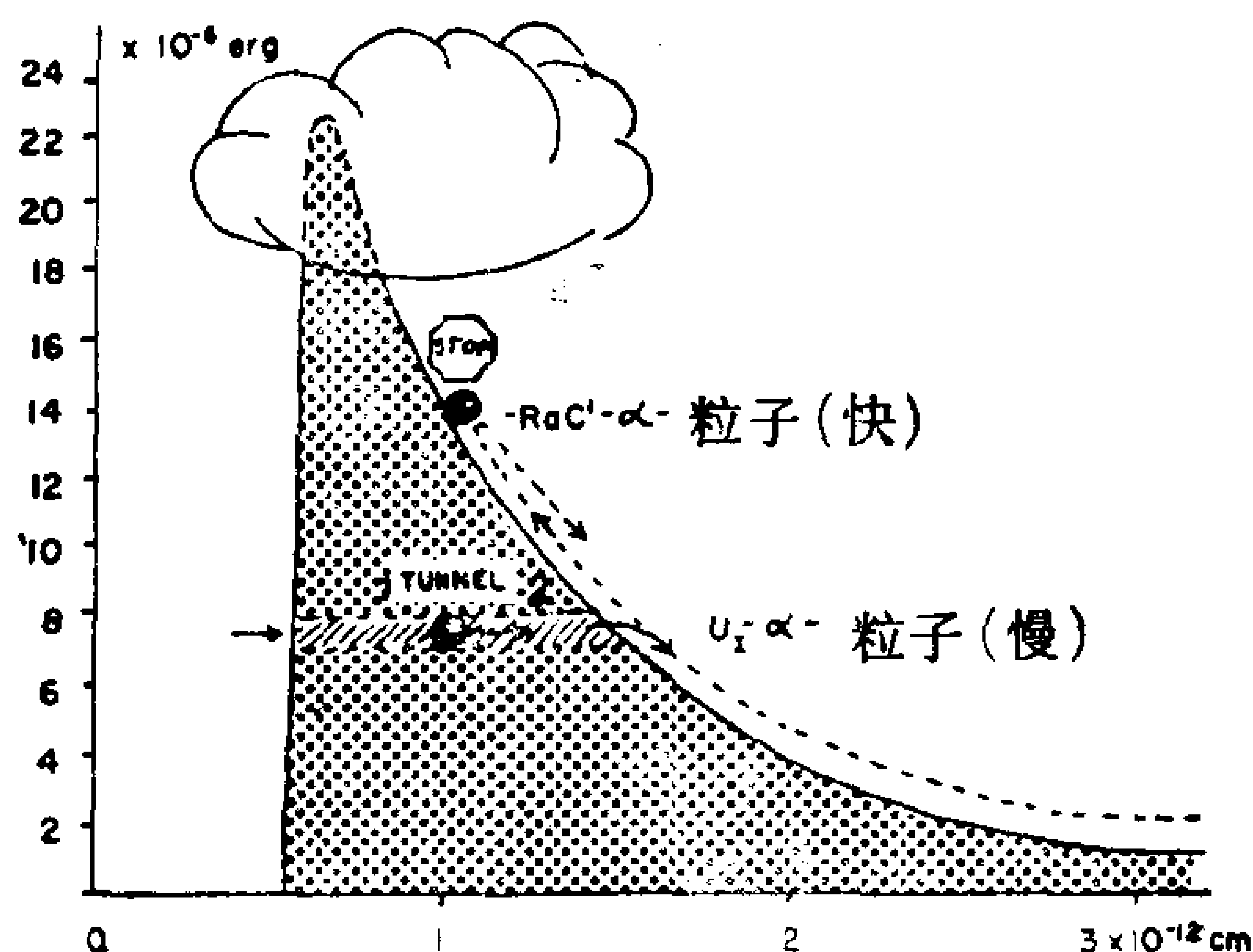


图 VIII-3　从卢瑟福的散射实验得出的铀核周围的势垒

能越过比它高几倍的势垒呢？根据经典力学，这当然是完全不可能的。如果我们在桌子上建一道木头壁垒，把一个球滚向壁垒，球的能量只有达到顶部所需能量的一半时，这个球就总是只爬到斜坡的一半的高度就滚回来了。但是波动力学得出不同的结论，为了理解这一结论，我们必须在德布洛意波和光波之间作一类比。在几何光学中，我们都熟悉"全内反射"的概念。如果光线穿过玻璃传播到玻璃与空气之间的交界面 *AB* 上(图 VIII-4 a)，假如入射角较小，它将发生折射而进入空气中，新的传播方向接近 *AB* 界面。但如入射角大于某一临界值时，光线就不会进入空气，而要完全在界面上反射。

然而，从光具有波动性的观点来考虑这一现象时，我们得出不同的结论。可以证明，这时是有一些光进入界面下面的空气的，但它们没有穿进太远，大约只进入几个波长厚度的空气层就反射回来了。图 VIII-4 b 中的线条不再是代表光线，而是代表辐射能量的流线，这张图说明了界面发生的情况。如果靠进界面 *AB* 放上

另一块玻璃，有些通过空气的流线就会进入第二块玻璃中。如果两界面之间的距离只等于几个光波的波长(即几微米)，这种现象就可以在实验中观测到。

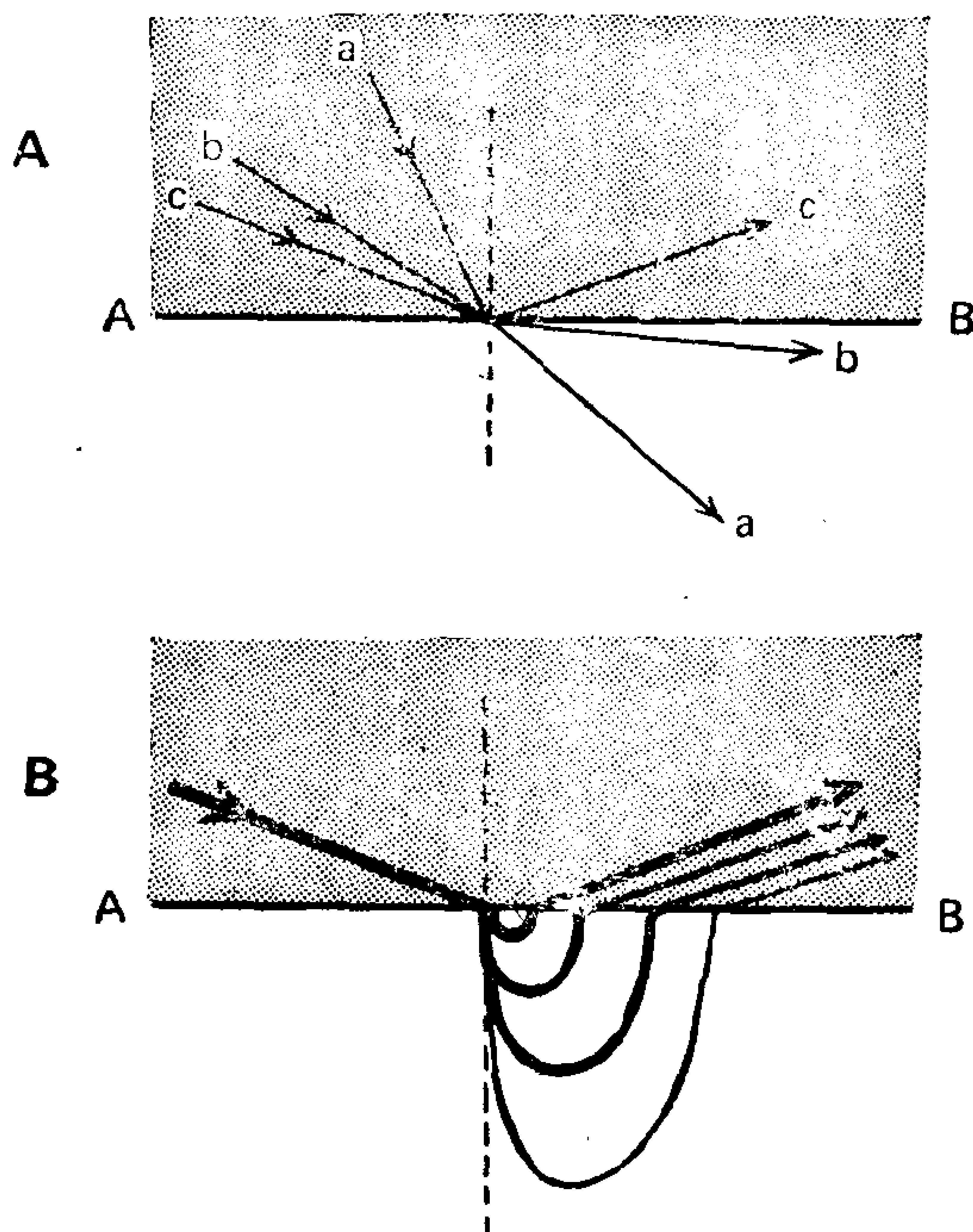


图 VIII-4　根据几何光学(a)和波动光学(b)考虑的全内反射

正如波动光学容许有几何光学所完全禁止的穿透现象一样，波动力学也能使物质粒子发生经典力学如果是百分之百正确的话就完全不可能发生的行为。

处于核内的 α 粒子是在高速运动的状态中，它们不断地与周围的势垒发生碰撞。引导这些粒子运动的德布洛意波将缓慢地透过势垒壁，因此 α 粒子有可能穿过势垒，尽管它们不能越过顶部。

核势垒的穿透率是极低的，在铀核情况下，10^{38} 次碰撞中只有一次能够穿出来。因为 α 粒子运动的空间直径只有 10^{-12} 厘米，速度是 10^9 厘米/秒，所以它与势垒的内壁每秒碰撞 10^{21} 次，即需要 $\frac{10^{38}}{10^{21}}=10^{17}$ 秒或几十亿年才能够穿出来。在 RaC′ 核的情况下穿过率较高，只要 10^{17} 次碰撞就有一次穿出来，所以相应的寿命变为 $\frac{10^{17}}{10^{21}}=10^{-4}$ 秒，与观测到的结果一致。基于这一理论对各种放射性元素的半寿期所作的计算与观测到的数字都是一致的。

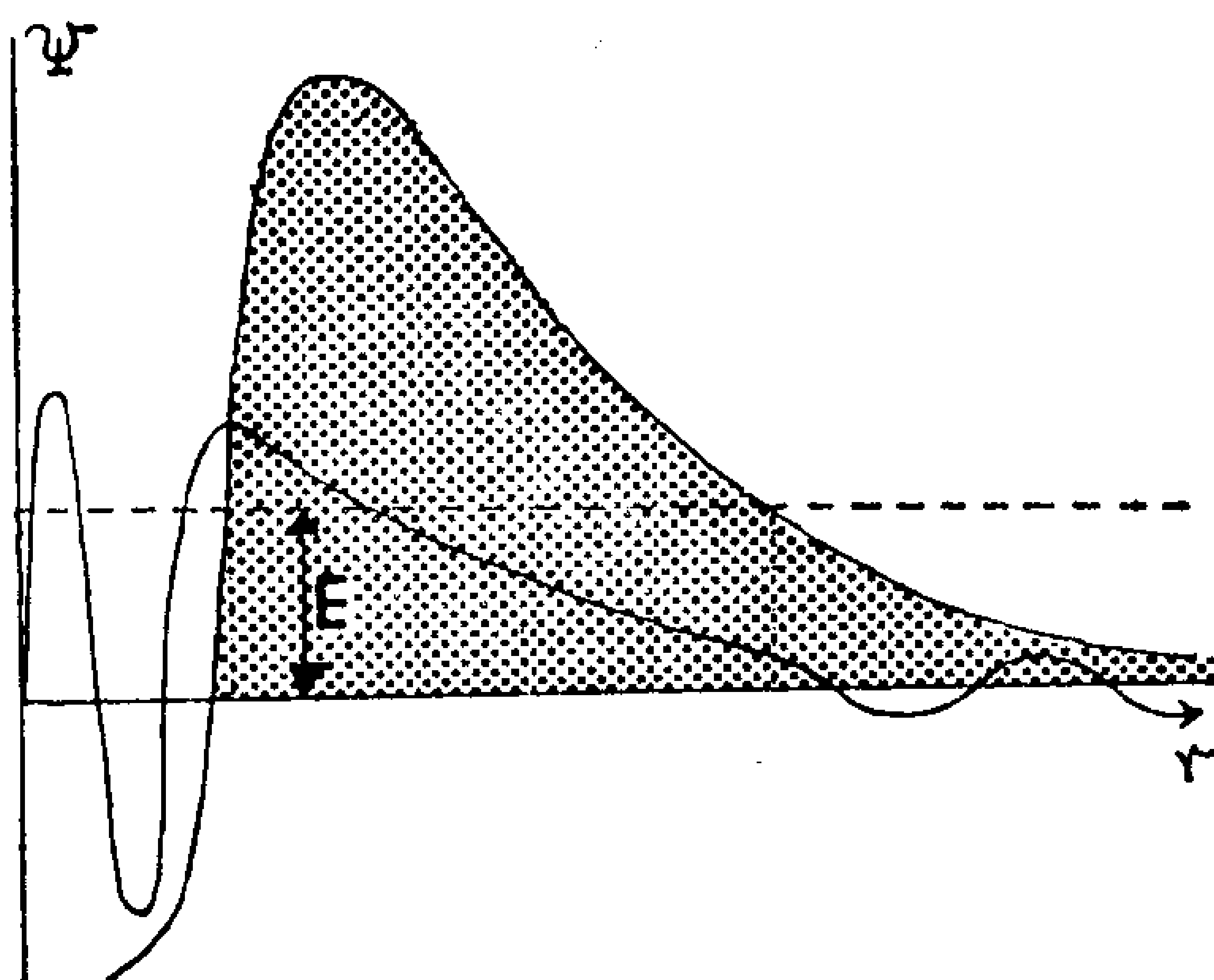


图 VIII-5　α 粒子根据波动力学穿过了核势垒

当然，这种波动力学现象只有在原子与原子核的领域中才具有重要意义。在上述那个小球滚上木头斜坡的实验中，虽然它的速度不足以越过顶部，但还是有一定的机会能穿过势垒，就象古代的幽灵穿过宫墙似的。不过，可以算出穿过的几率约等于 $10^{-10^{27}}$，即为一个在小数点后面有 10^{27} 个零的数。如果要写下这个数字，第一位有效数字将出现在用 200 英寸的望远镜才能够看得到的最遥远星系的附近，因此还是别去做小球滚上斜坡的实验吧。

原子核的结构与中子

把放射性现象解释为原子核的自发衰变，无疑说明原子核是由许多更小的粒子构成的复杂的力学系统。所有元素的同位素的原子量都很接近为整数，这个事实表明质子一定是原子核的组成部分之一。但只有质子还不够，举例来说，事实上碳原子核的原子量为 12，应包含有 12 个质子。而因碳核的电荷只有 6，所以还必须有 6 个负电荷，假定这些负电荷是由 6 个电子提供的，它们与 12 个质子结合起来形成了碳核。但是，在原子核内有电子存在的假设从量子理论的观点看来要导致极其严重的困难。事实上，由于电子的量子态能量随着电子被局限区域的缩小而迅速增大，可以预料在原子核内运动的电子要具有数十亿电子伏的能量。量子理论的这一直接结论看起来是很古怪的，因为尽管这样量级的能量可以在宇宙射线的情况下观测到，但在核现象中所涉及的能量只是兆（而不是十亿！）电子伏的量级。当玻尔告诉卢瑟福这个“活生生的事实”时，他们决定解救危局的唯一办法就是假设有一种不带电的质子存在，他们姑且把它叫做“中子”。有了这一假设，原子核内部就完全没有必要有电子了，例如碳原子核的组成可以写成：$_6C^{12}$＝6 个质子＋6 个中子。

二十年代的中期，在卡文迪希实验室开始了一项宏大的计划，目的是要把这些假设的“中子”从某些轻元素的核中踢出来，从而直接证明它们的存在。但结果是否定的，于是这方面的工作就暂停了，使中子的发现延迟了好些年。直到 1932 年，卢瑟福的学生查德威克在研究一种神秘的具有很强穿透力的辐射时（它最初是由博思在 α 粒子轰击铍靶的情况下观测到的），证明了它是一种中性粒子流，这种中性粒子的质量接近于质子的质量。这样，经过早

先的失败以后，中子终于还是在卡文迪希实验室里边诞生了。

β衰变和中微子

虽然α粒子的发射表示真正的核衰变，其产物是原子量较小的元素，β射线的发射则只表示是在原子核发射一个或多个α粒子后，对核电荷进行一下调节。在上一节的讨论中我们曾提到，原子核是由质子和中子构成的，在重元素中，中子数超过质子数。例如在 ${}_{88}Ra^{226}$ 中，中子数是 $226-88=138$，而质子数只有 88，两者之比是 $\frac{138}{88}=1.568$。镭核经α衰变后形成的氡核 ${}_{86}Rn^{222}$，只有 136 个中子和 86 个质子，两者的比例 $\frac{136}{86}=1.581$。这样，在α衰变的过程中，中子数对质子数的比例增大了，经过几次α衰变后，这个比例就会变得相当大，使这两种粒子难以和平相处。在这种情况下，中子就会自动转变为质子而发射一个负电子或β粒子。我们从 266 页的表上可以看出，β转化总是成对地发出的。这是因为核内的中子和质子也象原子中的电子一样要受泡利原理的限制，每个量子能级只能被两个粒子占据(其自旋相反)。这样，当一个能级变得不稳定时，这两个粒子先后发生β转化。

1914 年，年轻的英国物理学家查德威克当时正在柏林大学工作，受著名的物理学家盖格(盖格计数器的发明人)的指导。查德威克的任务是研究各种放射性物质所发射的β射线谱，β射线看起来与α射线和γ射线有着根本的不同，其动能表现得是连续分布的，从接近零值直到相当高的数值都有(图 VIII-6)。

当查德威克完成了这项工作并在当年秋天送去发表时，第一次世界大战爆发了，查德威克作为敌国侨民很快就被逮捕，一直被关在集中营里。在集中营中的第一年十分无聊，这位年轻而有才

干的物理学家没法在难友中找到什么朋友，他们大多是些实业家和银行推销员之类的人物。后来，在法国某地一次大战役之后，集中营里来了一位新的俘虏。他叫做埃利斯，是英国皇家苏格兰联队的一位优秀军官，是在战场上被俘的。这两个英国人成了朋友，为了消磨时间，查德威克就开始把核物理的现实情况教给埃利斯。战争结束后他们一起回到了英国，埃利斯成了剑桥大学的毕业生，查德威克则是剑桥的讲师。几年后埃利斯发表了一篇论文，对查德威克的工作做了重要的推广。

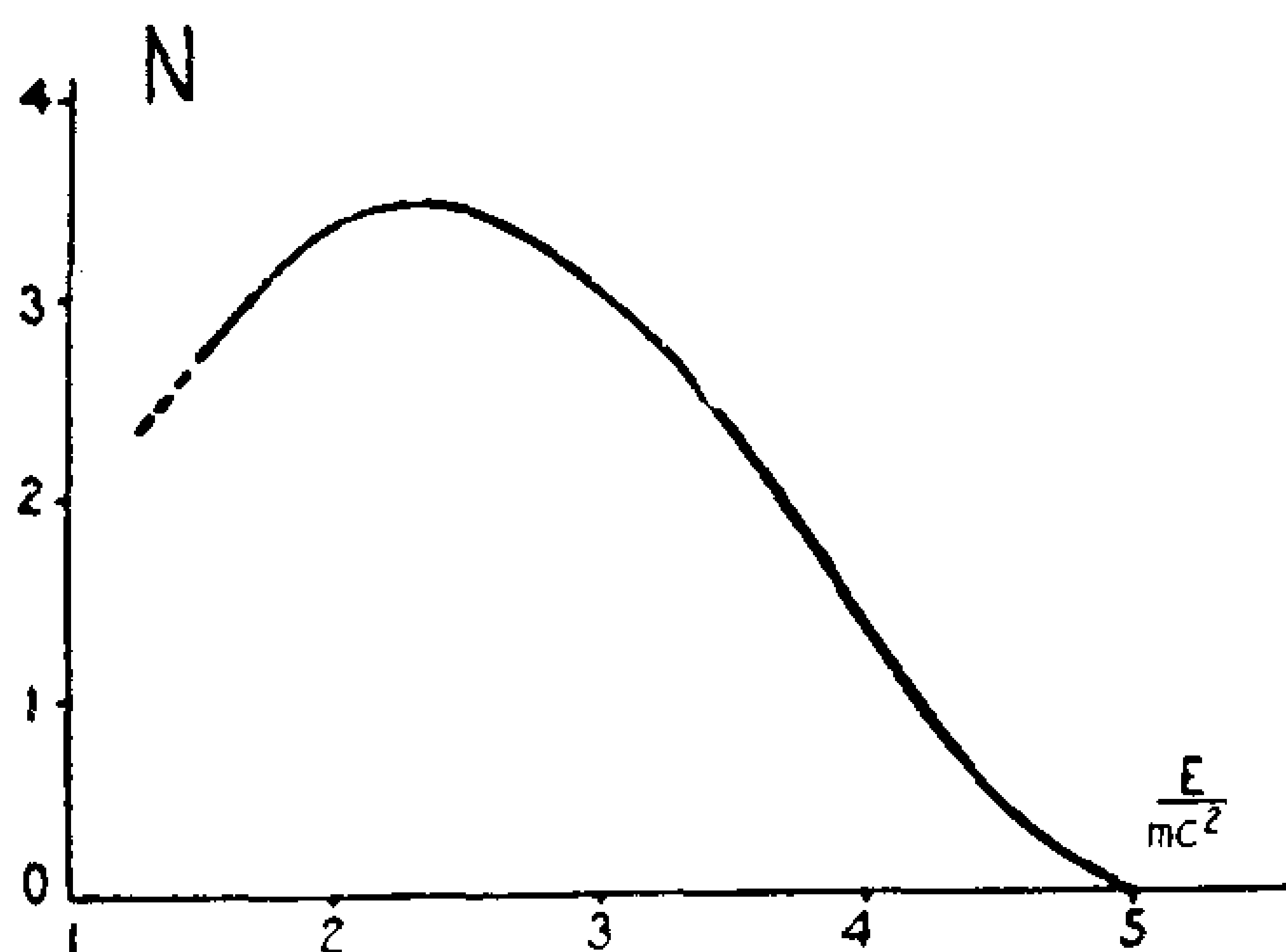


图 VIII-6 In^{114} 的 β 射线谱。电子数 N 与电子能量 E 的关系，E 以 mc^2 为单位。

β 射线连续能谱的一种可能的解释，是认为 β 粒子在从它们原来所在的放射性物质中逸出时，遭到了连续分布的能量损失。埃利斯设计了一个很精巧的实验，实验是把放射性物质所发射的 β 射线全部都吸收到一块铅板中，然后仔细地测量由此而产生的热量。实验结果表明，每个 β 粒子所释放的总能量刚好等于连续谱中电子的平均能量，这证明电子在物质中没有损失能量。这样，物理学家就面临着两难的境地。一方面，在一系列的放射性转变中，发射的 α 粒子总是具有明确的能量，它们等于母核和子核的内能之差，而另一方面，β 粒子的能量却在一个很宽的范围内连续变化。同一种放射性元素的两个核，若是一个发射快 β 粒子，另一个发射慢 β 粒子，它们之间的能量差又如何处理呢？玻尔面临这种

困境万分激动，以致很快就提出，能量守恒定律在β放射性转变的情况下也许不再成立，在发射慢β粒子时，有一定的能量也许散失到稀薄的空气中，而在发射快β粒子时，多余的能量可能是无中生有的。根据这个假说，能量守恒定律在基本核过程中只能平均地说来是成立的，因此要利用放射性衰变过程来造第一类永动机（参看第四章）还是不可能的。

泡利在这个问题上还是坚持自己的观点，认为另外有一种办法，会使核过程的能量账上达到收支相抵。他考虑有这样的可能性：β粒子的发射总是伴随有另一种“神秘粒子”的发射，它逃过了观测，打破了能量的平衡。如果假设这些核中的“巴格达窃贼”不带电荷，并且其质量象电子质量那么小，甚至还要小，它们的确是很容易逃过物理学家所精心安排的路障的，同时带走它们那一部分的能量。泡利给这些假想的“窃贼”起了个名字叫做“中子”。（这是在1932年之前，这一年查德威克才发现了现在称之为中子的粒子。）但所有这些讨论都是停留在交谈和私人通信的范围之内，这个名称从来没有被印在科学杂志上，也就没有得到过“版权”。后来当查德威克发现中子时，当时在罗马大学的费米教授（图VII-15）曾在研究班上报告了查德威克的论文，听众中有人问他查德威克的中子是否就是泡利说过的“中子”。费米答道：“不，查德威克的中子大。泡利的中子小，还是把它叫做中微子吧。”（在意大利文中，“中微子”就是小中子的意思。）

讲一些伟大科学家的小故事已经成为本书的习惯，因为费米是当代一位伟大的物理学家，所以我们这里根据他自己的话讲一个他的故事吧。由于他在物理学领域中的早期发现，他被选为意大利最高科学院的院士，并由墨索里尼授予“*Eccellenza*”的称号。有一次他开着自己的小菲亚特汽车去参加由墨索里尼亲自召集的科

学院会议，通向院子的大门旁站着两个警察。他们用卡宾枪拦住了费米的小车问他是什么人。费米想到："如果我说我是 *Eccellenza*，他们一定不相信，因为所有的 *Eccellenza* 看起来都十分高贵，并且乘的是由司机开的大轿车。"于是他对警察笑笑说，他是费米 *Eccellenza* 的司机。这句话解决了问题，警察就放他开进去等他的主人开完会出来了。

现在回来谈中微子，应该说这种粒子确实是很难抓住的，核物理学家长时间地在追猎它，但只能看到它造成的损害，而不能捉到这粒子本身。直到 1955 年，洛斯阿拉莫斯科学实验室的莱因斯和科旺设法捉到了它。最强的中微子源是原子反应堆提供的，在反应堆里，由于链式反应中形成的裂变产物的 β 衰变，会发射大量的中微子。即使是穿透力最强的 γ 射线和最快的中子，都被反应堆周围厚厚的混凝土屏蔽层有效地挡住了，但中微子却象一群蚊子飞过鸡栏那样，很容易就能穿过这屏蔽层。为了探测到它们，莱因斯和科旺在屏蔽层外面放了一个巨大的充氢容器，周围是一排排各种类型的粒子计数器。他们预料快速的中微子与质子碰撞时会使质子转变为中子而踢出一个正电子，即 $P+\nu\longrightarrow n+e^{+}$；但理论上估算出这一过程的几率是非常小的。为了探测到这个过程，他们利用中子计数器和正电子计数器并按如下方式把它们联接起来：仅当它们同时被中子和正电子打中时，它们才会发出一个信号，因为偶然符合的几率极小，所以两个计数器同时被打中只能是由上述反应所引起的。他们在反应堆完全开动时做实验，每分钟可以得到几个信号，而当反应堆关掉后，信号很快就消失了。从观测中他们发现，中微子使质子转变为中子这一过程的有效截面只有 $10^{-43}\,\mathrm{cm}^2$，这就意味着要使中微子的强度减小一半，需要利用几百光年厚的水障屏蔽。

由费米建立起来的发射电子和中微子的中子—质子转变的理论，与β衰变方面的所有实验数据都符合得很好。对后来发展起来的关于基本粒子之间各种转化过程的所有衰变理论说来，它也起了典范的作用。

第一个核破碎器

自从卢瑟福认识到放射性现象乃是一种化学元素自发地转化为另一种元素之后，他一直向往着能打破某种稳定元素的原子核，把它转变为另一种元素，这样就可以实现古代炼金术的梦想了。当第一次世界大战在1914年爆发时，英国海军部曾要求卢瑟福把卡文迪希实验室（他当时刚担任这个实验室的领导人）改为一个战争研究机构，来发展反潜艇的战争方法，以对付德国人的U型潜艇。卢瑟福拒绝了，理由是他有更重要的任务，就是要去打破原子核。确实，卢瑟福的这项工作给最强有力的战争武器原子弹和氢弹铺平了道路，但要说卢瑟福已预见到这些发展，那就不确实了。事实上，他在1937年去世之前不久，还和一位匈牙利物理学家西拉德就大规模释放核能的可能性问题有过激烈的争论，并坚持认为这是不可能做到的。西拉德为了证明自己的观点，跑到专利局去取得了从事大规模核反应的专利权。三年后，发现了铀核的裂变，又过了六年，第一颗原子弹在日本广岛的上空爆炸，结束了第二次世界大战。卢瑟福坐在天堂的云端在倾听竖琴音乐的时候，无疑也看到了这些发展，这位老人大概会想："结果怎样呢？现在这些……家伙利用我的发现来互相残杀了！"

但是我们还得回到1919年，看看卢瑟福在打碎原子核的工作上做了些什么。因为顺着门捷列夫周期表看下去时，原子核周围的库仑排斥力势垒变得越来越高，所以轰击较轻的核最有希望打

破。此外，快衰变的放射性元素发出的高能 α 粒子也会比慢粒子能更好地完成这项任务。因此，卢瑟福在第一次试验时决定用 RaC' 放出的 α 粒子去射击氮核，结果十分满意地发现，除了有被氮核散射的大量 α 粒子外，还有少数另一种类型的快粒子，卢瑟福认出它们乃是质子。卢瑟福最初是用闪烁法进行观测的，但不久由于利用了一项辉煌的发明而大大促进了核转变的研究工作，这项发明就是威尔逊的云室。我们在上一章讲到汤姆逊的实验时，曾提到过威尔逊的研究。云室的原理是基于这样一个事实：当带电的快速粒子通过空气(或任何其它气体)时，在其路径上将使气体电离。如果这些粒子所通过的空气与水蒸汽达到饱和，这样产生的离子就可以作为凝结成细小水滴的中心，因此我们可以看到有雾滴铺开在粒子的轨道上而形成细长的径迹。云室的结构如图 VIII-7 所示。它包括一个金属圆筒 C，它有一个透明的玻璃盖 G，还有一个活塞 P，活塞的上表面涂黑。活塞与玻璃盖之间的空气原先是与水蒸汽接近饱和的，光源 S 通过旁边的小窗 W 可将室内照亮。假定现在有少量的放射性物质放在针尖 N 上，针尖放在开口 O 的附近。

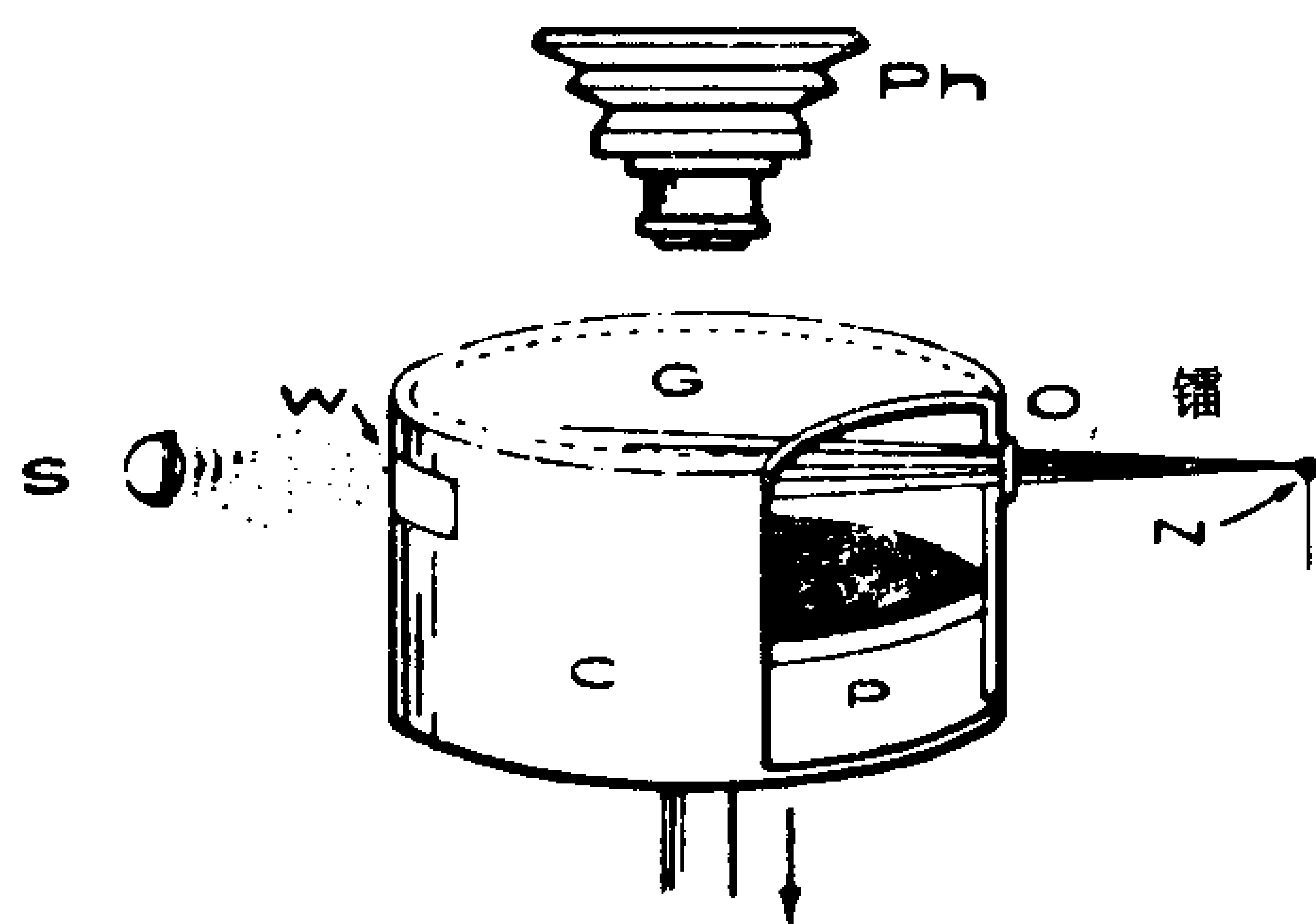


图 VIII-7　威尔逊云室结构图

由放射性物质射出的粒子将飞过云室，并使它们途中的空气电离。但是，因为空气与水蒸汽没有完全达到饱和，所以不会发生凝结现象，由通过的粒子产生的正负离子很快又重新结合为中性

的分子。但现在假定活塞很快被拉下一定距离，由于活塞与玻璃盖之间所装空气的膨胀，将使空气的温度降低，从而引起水蒸汽凝结，这与大气层中由于潮湿空气上升而形成云雾的道理完全一样。但因为这时带电粒子通过云室而产生了离子，离子的出现就大大促进了水蒸汽的凝结，在粒子的径迹上将形成雾滴，在照明光束的照射下衬托着黑暗背景，就清楚地显出了雾滴的痕迹。通过玻璃盖观看可以直接看到这种景象，也可以用照相机把它照下来。

在照片Ⅴ(上)中我们看见的是人工核分裂的第一张照片，它是布拉凯特在1925年拍摄的。从照片一边外面的一点散开了大量径迹，它们是由放在该点的放射性物质所发出的α粒子产生的。这放射性物质是RaC和RaC′的混合物，后者是由RaC经过α衰变过程生成的。RaC发出的α粒子运动得较慢，在照片的中间就被空气止住了。RaC′的α粒子差不多是放射性元素所发射的最快的粒子，能穿透较厚的空气层，所以它们的轨迹一直延伸到照片的另一端。在照片的中上部可以看到一个分叉，这是由于氮核在α粒子的碰撞下发生了转化。向左走的细长径迹是从核中踢出的质子产生的，而继续前进的粗轨迹则是由快速运动的氧原子核引起的。这里发生的化学转变可以用公式${}_7N^{14}+{}_2He^4\longrightarrow{}_8O^{17}+{}_1H^1$来表示，按惯例，其中下标表示原子序数，上标表示原子量。${}_8O^{17}$原子是普通氧${}_8O^{16}$的较重同位素，它在大气中的含量很少。如果测量出这个反应中生成的${}_1H^1$和${}_8O^{17}$的能量(根据它们径迹的长度可以做到这一点)，我们就可发现它比α粒子原来的能量小1.26兆电子伏。若把上述反应方程两边质量分别加起来，就得到

$$\begin{array}{rr} He^4= & 4.00388 \\ N^{14}= & 14.00755 \\ \hline & 18.01143 \end{array} \qquad \begin{array}{rr} H^1= & 1.00813 \\ O^{17}= & 17.00453 \\ \hline & 18.01266 \end{array}$$

即平衡能量在这种情形下是负的，等于−0.00123个单位，相当于−1.16兆电子伏。这个数字在实验误差的范围内，与反应中上述能量损失的数字是相符的。这种测量是爱因斯坦质能等价定律第一次直接的实验证明。因此，在这个反应中，核能不是被释放出来，而是损失了。但在其它情况下，例如用α粒子轰击铝时，可获得大量核能。

因为α粒子是天然放射性元素发射出的仅有的重粒子射弹，所以关于人工核嬗变的早期工作都只是局限在这种类型的反应上。1939年，本书作者当时正在剑桥与卢瑟福爵士一起工作，根据势垒理论算出用质子当射弹会好得多，因为质子的电荷要小些，质量也小些。事实上，计算表明，质子在一百万伏电压的加速下运动而能量比RaC′的α粒子能量小几倍时，应能使轻元素产生显著的分裂。卢瑟福曾请他的学生科克罗夫特(现在已经是约翰爵士)和沃尔顿造一架能产生这样大能量质子流的高压机械，第一台“原子破碎机”是在1931年投入了运行的。科克罗夫特和沃尔顿用质子流射向锂靶时，发现每一次有效的碰撞后都有两个新产生的α粒子从碰撞点向相反方向飞开，这一反应显然是${}_3Li^7+{}_1H^1\longrightarrow 2\,{}_2He^4$。若用硼代替锂，他们观测到三分叉的现象（照片V，下），这表明硼核被质子碰撞后分裂成三个相同的碎片，即${}_5B^{11}+{}_1H^1\longrightarrow 3\,{}_2He^4$。

紧接在科克罗夫特和沃尔顿这项开拓性的工作之后，人们依据种种巧妙的原理发展了越来越大的粒子加速器。有一种原子破碎器叫做范德格拉夫加速器，是以发明者的名字命名的。它所依据的是一个简单的静电学原理，即电荷通过一开口被引入一球形金属空腔的内部，电荷分布在球的外表面上。事实上，由于电子之间存在相互排斥力，将驱使它们彼此尽可能离开得远些。范德格

拉夫的机器包括由一个巨大的绝缘金属球和一传送带，传送带不断地在外面充电，进入球内后又放电。尽管范德格拉夫加速器所能产生的电压至多只有几百万伏，但它已发展成为一种精密而完善的设备，非常适宜于做多种实验工作。

另一种更巧妙得多的加速核粒子的装置是由劳伦斯发明的，现在加利福尼亚大学的辐射实验室就是以他的名字来命名的。这种加速器所依据的原理完全不同，它是利用带电粒子在磁场中沿圆周运动而获得多次加速。这种回旋加速器的原理如图 VIII-8 所示。它的主要构件是两个半圆形金属盒 C_1 和 C_2，并把它们放在一块很强的电磁铁的两极之间。半圆形盒 C_1 和 C_2 与一交变高压电流 AC 相联，使得两个半盒隔缝之间的电场周期性地改变其方向。把用作原子射弹的元素离子注入盒子中心处 I，速度较低时，这些离子的轨道在磁场中便被弯成较小的圆形。回旋加速器的窍门在于，对给定的磁场来说，带电粒子沿圆周轨道运动的周期与粒子运动的速度无关。因为轨道半径和圆周长度的增大正好与速度的增大成正比，所以转动一圈所需要的时间不变。

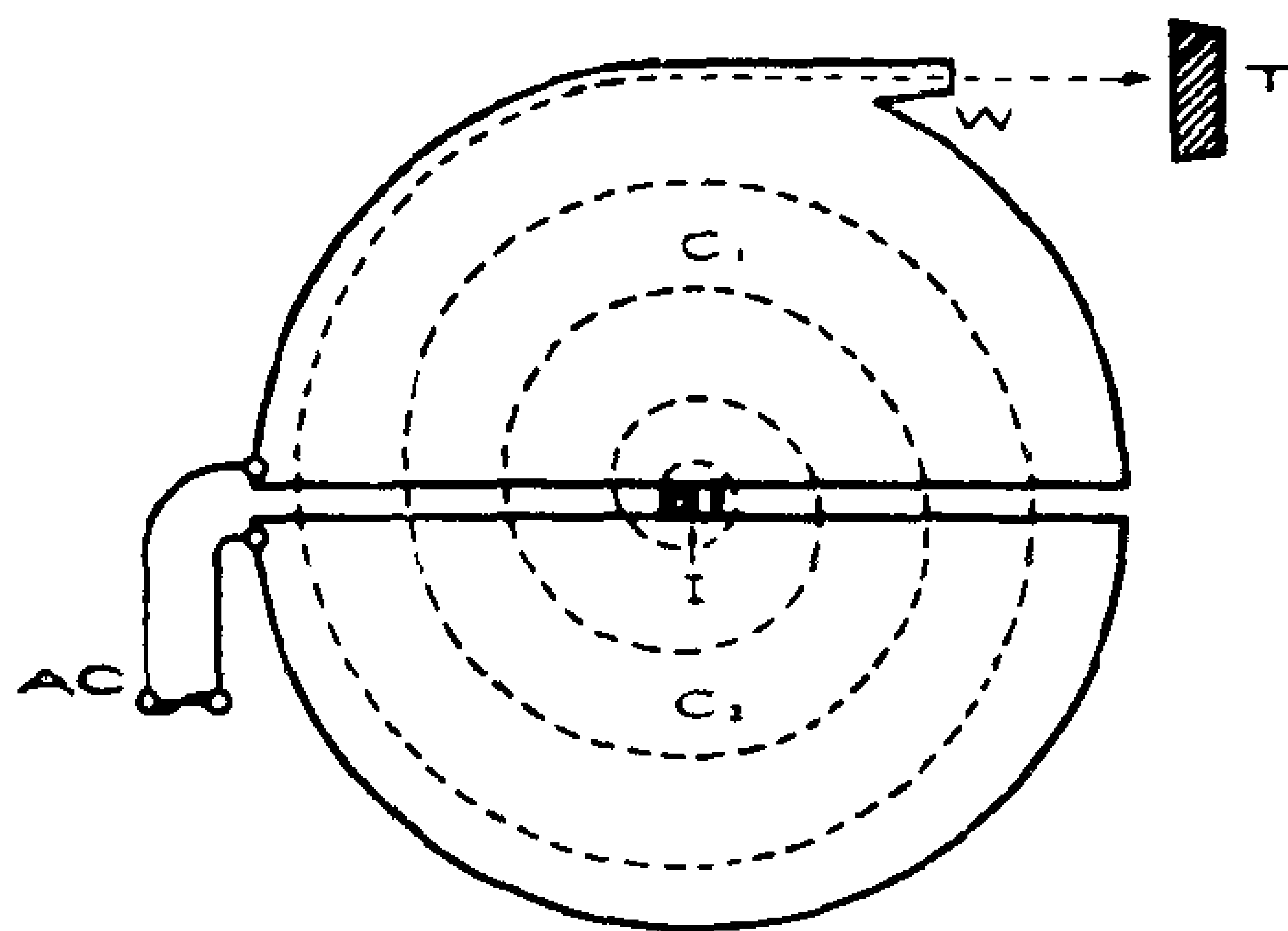


图 VIII-8　回旋加速器原理

如果适当地安排仪器，使得离子注入磁场后转动的周期等于电源 AC 所产生的交变电压的周期，那么粒子到达两半盒 C_1 和 C_2 之间的边界时，每次受到的电力作用的方向就会与粒子运动的方向相同。这样，每当粒子通过边界时都可得到附加的加速度，因

而其速度将不断增大。离子一面沿着一条拉开的螺旋形轨道运动，一面速度在不断增大，最后向着靶子T的方向从窗口W中射出。

照片VI中上面一张照的是科罗拉多州立大学建造起来的回旋加速器，预期它可产生能量约为30 mev的质子束。照片中可以清楚地看出大型电磁铁和支柱的半部。加利福尼亚大学的高能质子同步稳相加速器（照片VI中下面一张）和长岛的高能同步稳相加速器则体现了原始的回旋加速器原理的进一步发展。

不同的物质在快速核射弹的轰击下引起种种核转变，物理学家在描述有关这些核转变的实验结果时，总是讨论其“有效截面”或简单称“截面”。为了弄懂这个概念，让我们来考虑高射炮试图把飞来的敌方空气船击落的情况。如果敌人很愚蠢，派来的是一艘小飞船（图VIII-9 a），对船体任何部分的一击都是致命的，所以“有效截面”就等于飞船的几何截面。但如果是飞机（图VIII-9 b），弹皮可以穿过飞机结构的许多部分而不致使它“被打死”。只有很小的面积能致命，例如飞行员的头部和身体、引擎和舵盘的关键部分等，打中这些地方一定可以击落飞机。这些地方总的侧面积称为“有效截面”，它可以大大小于物体本身。例如阿基利斯的“被杀截面”仅限于其左脚跟上的几个平方英寸*。

在考虑杀伤几率时，不论是敌机还是原子核，我们只对一定要击中的那一部分总的侧截面感兴趣，而不必关心这些敏感部位的精确位置。这就好象两个决斗者的情况，假定有一个人很瘦小，而另一个人很胖。胖子抗议说，这情况不公平，因为他给对手提供了一个面积大得多的弹靶。“好，”瘦子回答道：“那请你的副手用粉

* 译注：阿基利斯 Achilles 是希腊神话中的英雄，传说他全身刀枪不入，只有左脚后跟除外。

笔在你的衣服上把我的轮廓画下来，打中线外不算。”

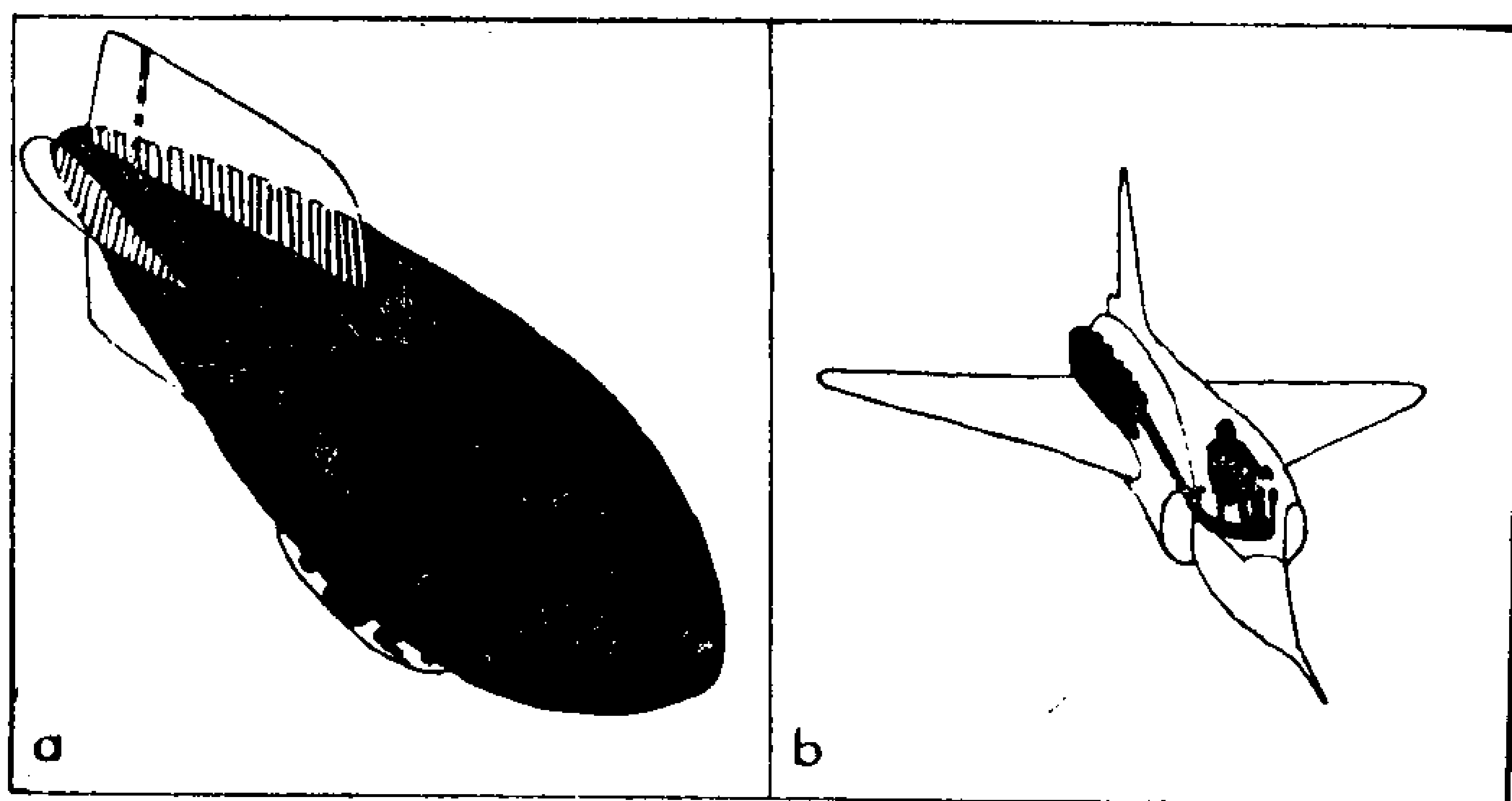


图 VIII-9 (a)小型飞船的“击杀截面”(黑色面积)；(b)飞机的“击杀截面”(假设是自封式油箱)

原子核的半径为 10^{-12} 厘米，所以它的几何截面大约是 10^{-24} (厘米)^2。截面正好等于 10^{-24} (厘米)^2 时称为一“巴”，它是太大了，如果一个原子核每次被碰撞都被打碎，有效截面就是一巴。但是，如果因为某种原因，每碰撞一百次才有一次破裂，我们就说有效截面是 0.01 巴，即 10^{-26} (厘米)^2。在下面的讨论中，读者将发现在核轰击过程中甚至还有更小截面的例子。

原子核的结构和稳定性

原子中的电子是在空间自由地飞行的，彼此之间保持的距离要比它们的直径大几千倍。但构成原子核的质子和中子却是象罐头里的沙丁鱼似的紧紧地挤在一起的(图 VIII-10)。因此，在原子的情况下我们可以说电子是电子气，它们具有许多普通气体的性质，但核物质就应当比作一颗液滴才较为贴切，液体中的分子是靠

内聚力紧挤在一起的。原子核的这种"液滴"模型是由本书作者在大约 30 年前提出的，它可以使我们理解核的很多性质。首先，气体由于气体分子之间有着许多空间而很容易被压缩，但对液体来说，无论施加多大的压力，它们体积的变化都很小。的确，前已述及，当我们顺着门捷列夫周期表往下看时，原子的体积基本上保持不变，越来越多的电子被挤在直径越来越小的量子轨道上。另一方面，测量表明原子核的半径随其质量的立方根而增大，所以体积随质量增大，而密度保持不变。这种核液体（其液滴便构成原子核）的密度比水的密度大 10^{14} 倍，装满了这种液体的一个小酒杯会重达 50 亿吨！和任何一种别的液体一样，核液体中也表现有表面张力现象，因为位于表面上的核子由于其它核子的内聚力而被向里拉，所以核的表面积有缩小到最小的趋势。但是和密度一样，核液体的表面张力比普通液体的大得多。如果用一根 U 型导线和一段横放的导线搭起一个框架，在框架上张起一层肥皂膜，那么，作用在这根可动直导线上的表面张力大约可以支持 70 mg/cm 的重量。如果能用核液体这样做，这个力就会达到 100 亿吨！由于表面张力，原子核近乎为球形，就象雨滴的情况一样，这些细小液滴的振动和转动一定要引起受激核 γ 射线的发射。

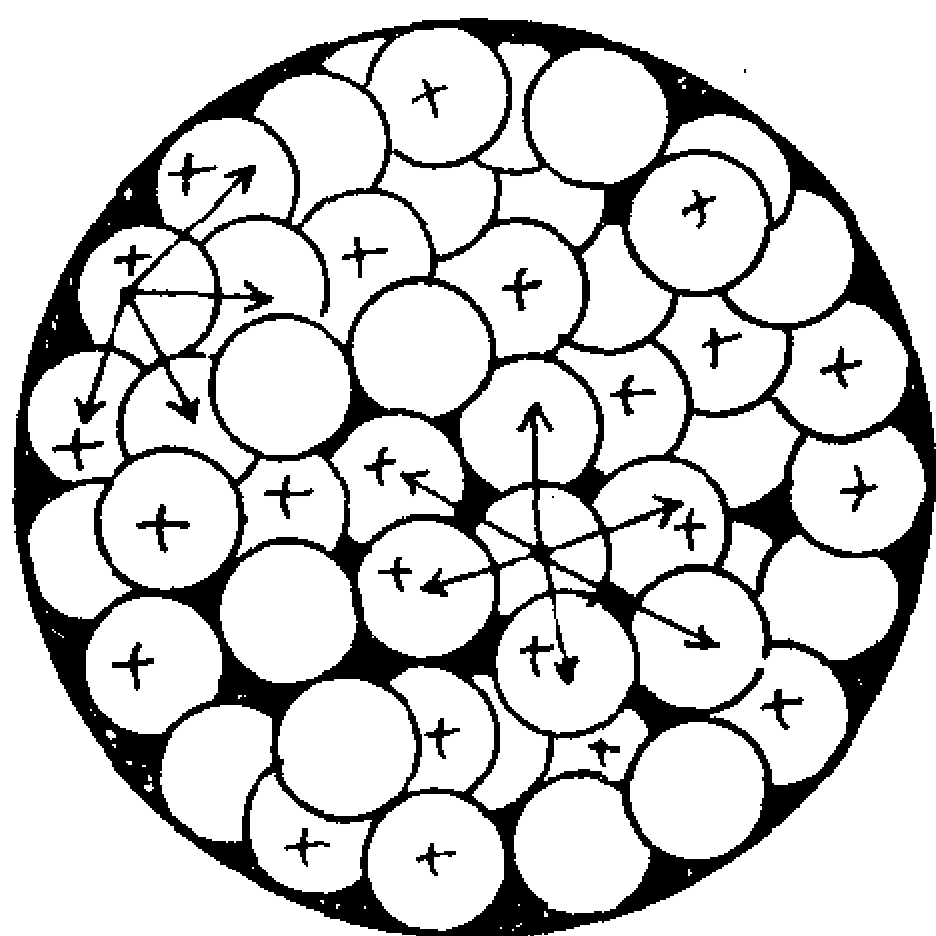


图 VIII-10 原子核由质子和中子构成。核内的粒子不受力，但表面上的粒子要受向里拉的力。

但是，普林斯顿的物理学家惠勒曾指出，核液体也许并不一定表现为小球的形状，而是原则上可以取不同的形状。关键在核情

况下除了核内聚力之外，还存在着带正电的质子之间的库仑排斥力。惠勒在他的一篇未发表的论文中证明了，这些斥力的存在可以使原子液体呈轮胎形状。事实上，在这情况下，趋使轮胎形收缩为球形的表面张力，会被其相反两边的电斥力所抵消，整个结构将是完全稳定的。这种轮胎要比铀核大得多，原子量高达好几千，它们周围的电子将在其表面附近运动，其轨道就象一个环形电磁铁上的线圈一样*。这种轮胎状核在自然界中是不存在的，也难以想象将来有可能被技术高超的核物理学家制造出来。但是惠勒指出，如果它们能被造出来，我们就可以用它们连制成长链，用这种核链制成的线就会极其结实，象蛛网那么细的线可以承受一只战舰的重量。但它也会很重，一码长的核线重达 1000 吨。

惠勒的轮胎核似乎永远不会找到实际应用，但是同样受这两种力作用的比较简单的核形状，却为我们打开了原子能的时代。让我们来考虑一下原子核的表面张力与电力之间的平衡吧。总的表面能当然与表面积成正比，并随着核的增大而增加。因为核流体的密度是常数，所以它的体积便与其质量（原子量）成正比，半径则与质量的立方根成正比。因此，与表面积成正比的总的表面能是随质量立方根的平方成正比，换句话说是与质量的三分之二次方成正比。为了算出库仑能量，我们得利用一个静电学定律。这个定律说，一个带电球体的能量与其电荷的平方成正比，而与其半径成反比。核电量由它的原子序数决定，原子序数近似地正比于原子量。考虑到半径是随原子量的立方根而变化，故可得出库仑能近似地是随原子量的 $1\frac{2}{3}$ 次方而增加，这要比表面张力能量的增加快得多，所以我们得出结论：虽然在轻核中静电斥力起的作用也许较小，但在重核中它们会变得很重要。因为表面张力总是要

* 参看图 V—11。

使液滴保持为一体，两个液滴碰到一起时，有合成一个较大的液滴的趋势，所以在轻元素的情况下可以指望核聚变过程会有能量释放出来。另一方面，在重核情况下库仑斥力会占上风，所以核裂变是放能的过程。计算表明，"聚变区"一直往下延伸到门捷列夫周期表大约 $\frac{1}{3}$ 的地方，随着我们逐渐接近这一界限，预期释放的能量将越来越小。"裂变区"从这一点开始，起先释放的能量较低，以后迅速增大，对于最重的元素达到最高数值。这样，每一种化学元素都代表一个潜在的核能源，问题仅在于怎样开始核反应并且使这些反应继续进行下去。

原子核的液滴模型是真实情况的一个很好的近似，但我们不要忘记，核内的质子和中子与原子中的电子一样，也要服从同样的量子定律，这必然会与上述简单图象发生一定的偏差。的确，更仔

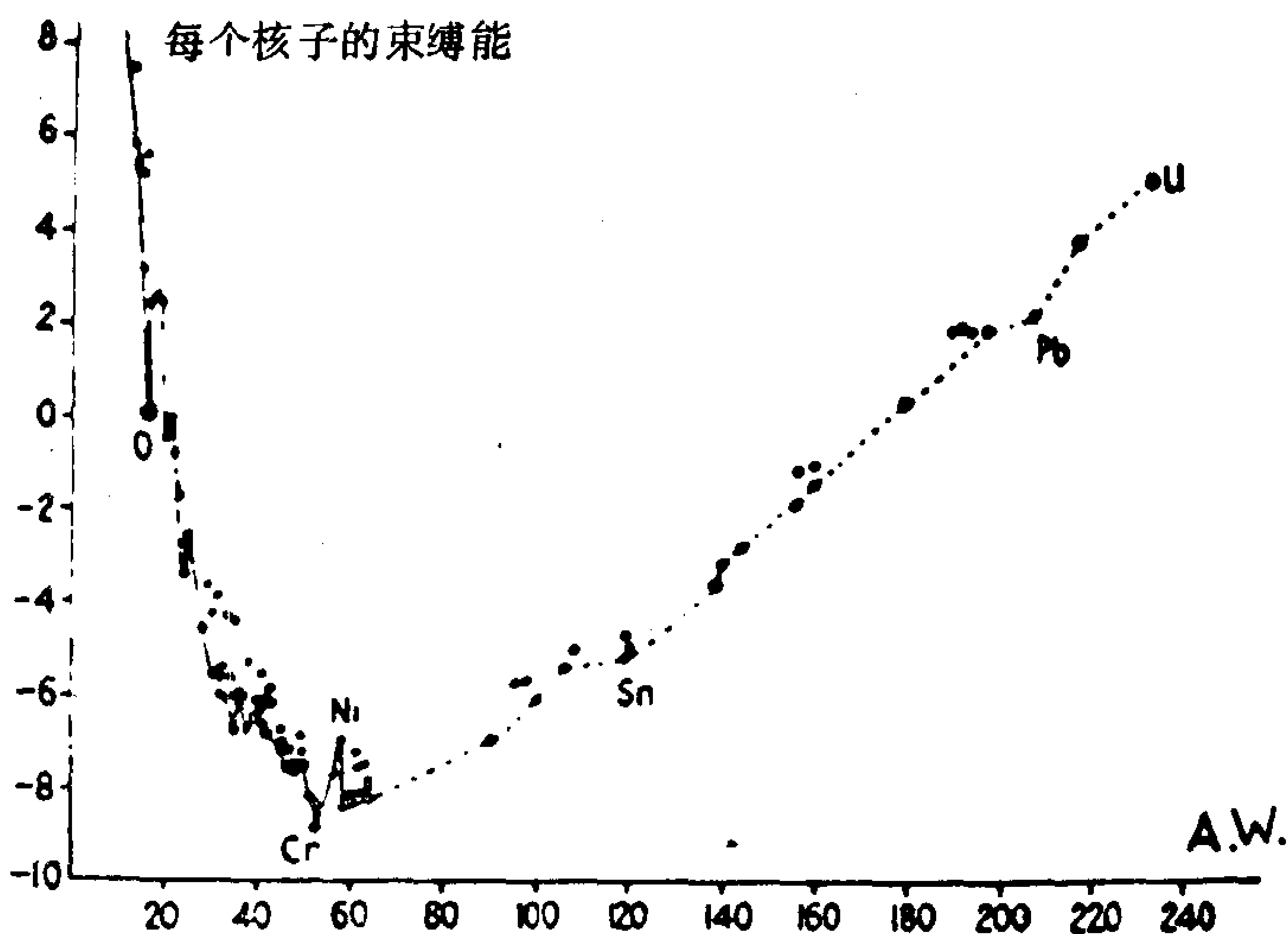


图 VIII-11 每个核子的束缚能量是原子量的函数。

细地研究核的性质后就可以发现这些偏差。图 VIII-11 表示从最轻元素到最重的元素这整个范围内每个核子结合能的变化。我们看到在这曲线的前一部分结合能是有规则地减少的，以后又缓慢增加，这对应于聚变区和裂变区。但我们也看到曲线不是很平滑的，有许多纽结的地方，这表明核子之间有着反常强烈的结合。这些地方对应于核内的满核子壳层，与原子中的满电子壳层完全类似。在原子情况下，具有满电子壳层的元素（惰性气体）在化学上是不活泼的，因为其电子配置已经排"满"了。核的情况有着类似的效应，如图 VIII-12 所示，该图表示入射中子被不同元素的核俘

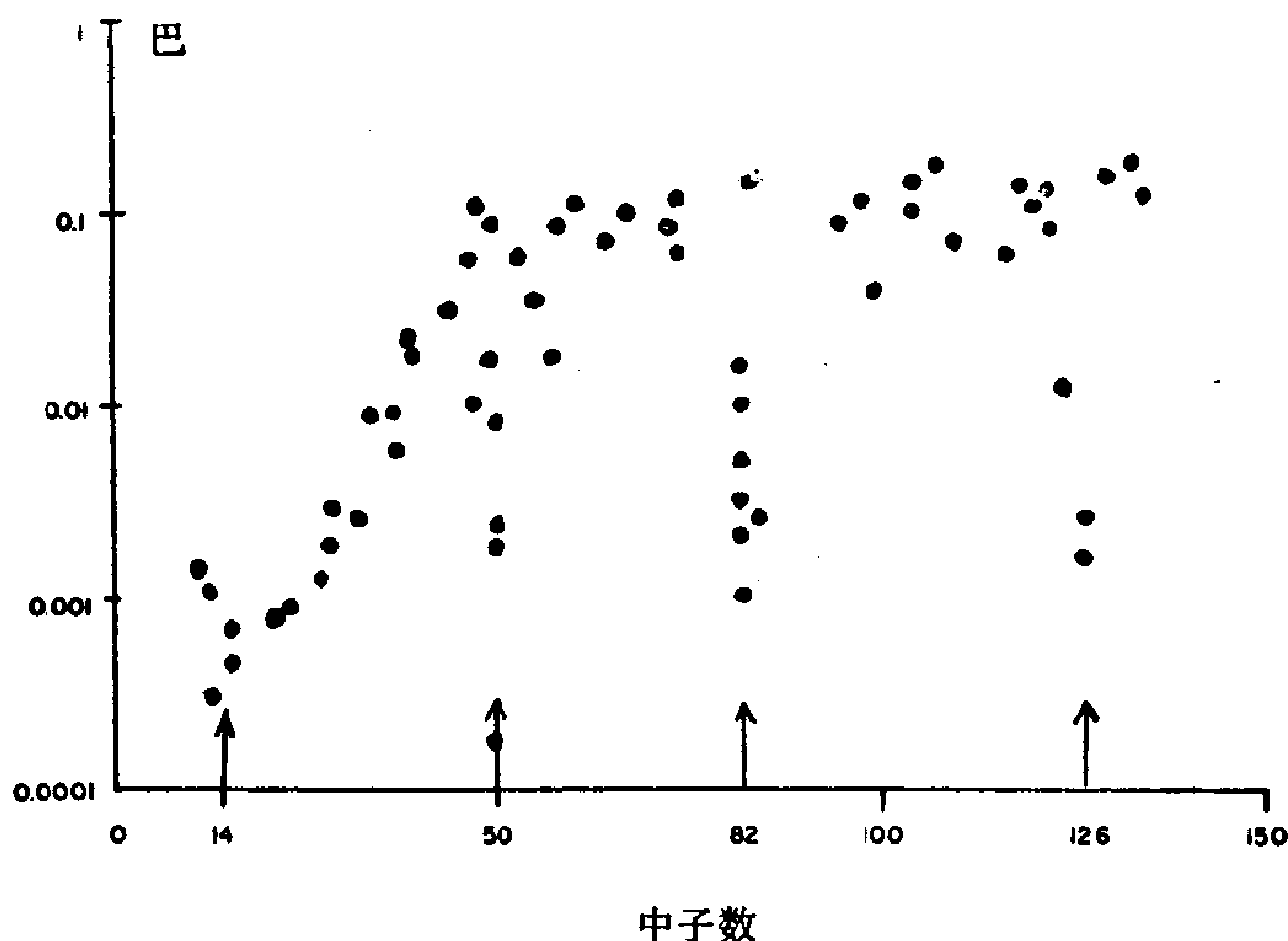


图 VIII-12　俘获中子的"俘获截面"是核中含有中子数目的函数。

获的相对几率。对核内已有的某些中子数(50,82,126)来说，俘获另一中子的几率急剧下降，表明这些核中含有满壳的中子。对核性质的这些不规则性和许多其它不规则性的研究导致了如下的结论，即每当核内的中子数或质子数等于下列各数之一时便形成强

结合的核子壳层：2，8，14，20，28，50，82和126。但是必须指出，原子中每个新的电子壳层基本上是位于前一壳层的外面，形成葱头似的结构，而核内的中子壳层和质子壳层则是互相穿插的，每个壳层占据着整个核体积。核子壳层之间这种缺乏清楚的几何界线的情况，使得它们的效应不那么显著，研究和解释起来都比较困难。但是，这个困难分别独立地被芝加哥的迈耶和海德堡的詹森同时克服了，他们建立了一个关于核子壳层的完整理论体系，与观测事实完全符合。当他们会到一起比较他们的结果时，发现两人是同年同日生的，于是后来成了很要好的朋友。

裂变链式反应

1939年1月27日，由华盛顿大学（当时作者正在那里任教）和华盛顿的卡内基研究所联合组织的一次理论物理小型会议，继续在华盛顿拖拖拉拉地举行着。那一天，来访的贵宾之一玻尔收到了一位德国女物理学家梅特娜的一封信，这位女物理学家当时正在斯德哥尔摩工作（由于希特勒的缘故）。信中说她曾收到她以前在柏林的同事奥托·哈恩的一封信，告诉她哈恩和他的助手斯特拉斯曼在用中子轰击铀时，发现有钡出现，这个元素大约在门捷列夫周期表中间偏下的地方。梅特娜和跟她一起到斯德哥尔摩的外甥奥托·菲施（注意有两个奥托在干这件事！）想到这也许就是裂变的结果，即一个铀核在中子的撞击下分裂为二。玻尔向与会者把这封电报刚一念完，讨论立即就从会议原订的不那么令人兴奋的题目转为一场热烈的争论，争论的题目是铀核的裂变是否有可能导致大规模核能的释放。费米也参加了会议，他走到黑板前写了有关裂变过程的几个公式。华盛顿日报的一位记者在会议的前半截一直在舒舒服服地打盹，这时也醒过来开始注意谈话了，但

是卡内基研究所的一位物理学家图夫很快就指了指大门请他出去，说这个讨论对他来说太专业性了。这是采取安全措施的第一步，后来很快就给"原子能"的发展规定了种种条例。但是记者把前面听到的内容还是登上了报纸，第二天早晨作者就被加利福尼亚的奥本海默打来的长途电话叫醒了，他想要知道这一切是怎么回事。事情就这样开始了。

玻尔和惠勒关于核裂变理论的论文是发表在1939年9月的"物理评论"上的，是在保密措施下达之前公开发表的第一篇也是最后一篇关于这个题目的论文，这篇论文的根据就是上面讨论过的原子核的液滴模型。当原子核被入射中子击中时，便开始振动，由于经历了一系列形状被拉长的过程，表面张力与静电力之间的平衡遭到了破坏，前者力图使原子核恢复原来的球形，而后者则力图使它进一步变长。如果椭球的长轴与短轴之比超过一定的限度，沿赤道平面分裂的可能性便加剧，原子核就会整整裂成两半（图VIII-13）。人们很快就发现，铀核裂变时同时要发出一对（更确切说是2.5个）中子，它们又会打中两个旁边的核，并击破它们。这又会产生四个新的中子，它们又可粉碎另外四个核……这样就可发展起来一种链

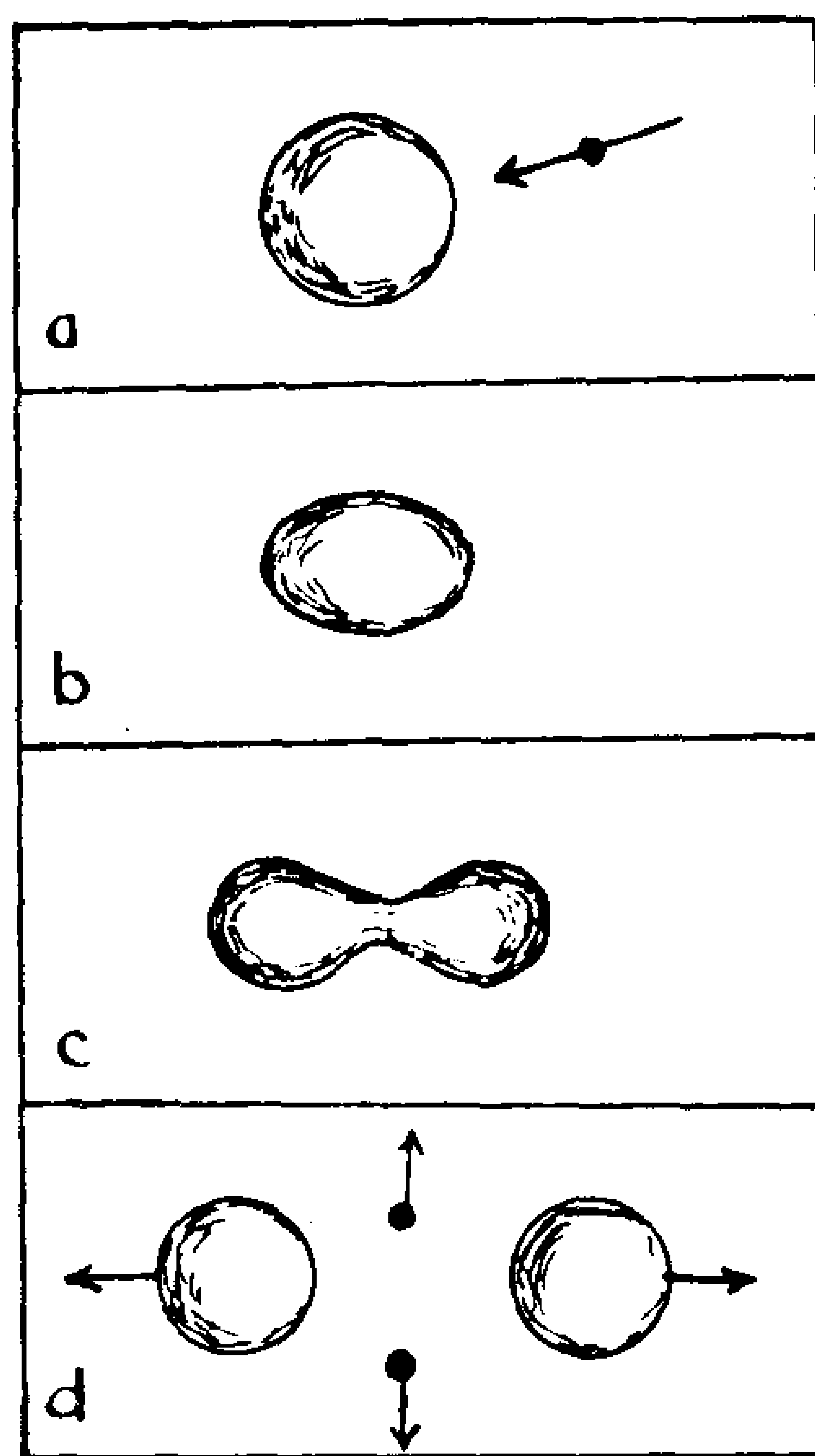


图 VIII-13　由中子碰撞引起的重核裂变

式反应，很快就把整块的铀都卷入，而释放出极大量的核能。

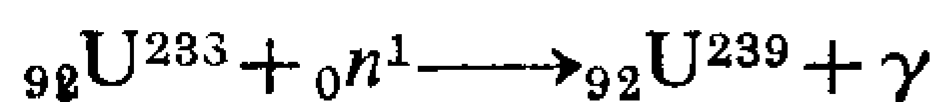
要写一篇关于一般所说的“原子能”方面的文章是很困难的。在早期，大部分事实和资料都由于保密措施而被隐藏起来了，关于这个时期没有多少东西可写。但是，现在在无数的书籍、杂志和报章里，可以找到大量材料，这个题目又变得有些不新鲜和平凡了。此外，虽然铀核的裂变可以看成是物理学历史中十分有趣的一段（但也只有一段），但原子弹、反应堆和核燃料的发展确切地说是属于技术领域。所以，除了复制两张很漂亮的（尤其是用彩色复制时）照片以外（在照片 VII 中，一张是原子弹的，一张是游泳池式反应堆的），我们在这一节中将只讨论最基本的步骤。

首先，有一个令人沮丧的事实早在上述华盛顿会议上就暴露出来了。那就是表现出裂变现象的并非铀的主要同位素，而是非常稀少的同位素 U^{235}，它的含量只占 0.7%。此外，在天然铀中其余占 99.3% 的主要同位素 U^{238} 还不仅仅是无害的混合，而是对中子有着很强的嗜好，它们俘获中子的速率足以扑灭能在 U^{235} 中开始的任何链式反应。有两种办法可以对付这种情况：要么把 U^{235} 从有害的 U^{238} 中分离出来，要么想法子使 U^{238} 不再那么贪吃中子，让反应在天然铀中继续下去。

两种办法都试过了。在田纳西州橡树岭的一家秘密工厂里，研究过各种分离铀同位素的方法，最后的成果是用扩散法，其根据是含有轻同位素的铀化合物通过多孔的薄膜时，跑得要比含重同位素的铀化合物快一些。

使反应在天然铀中继续下去的技术，主要是由费米根据减速原理提出的。人们发现，重的铀同位素对运动得较快的中子有着更大的欲望，而轻同位素则喜欢很慢的中子。因为铀核裂变中所发出的中子速度很高，所以我们得使它们慢下来，慢到 U^{235} 喜欢

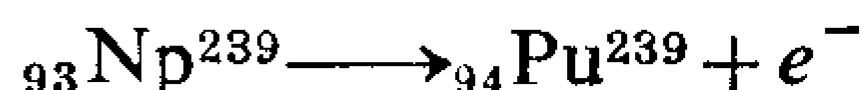
而又不会被 U^{238} 俘获的程度。把天然铀与大量所谓的“减速剂”混合在一起，就可以达到这个目的，“减速剂”是这样一种元素：其原子对中子毫无欲望，而在碰撞过程中可取走中子的一部分动能。已证明最好的减速剂是氘原子（重氢同位素）和碳原子，它们决定了现在使用的两种反应堆型式（石墨型和重水型）。第一个原子反应堆是用碳作减速剂（石墨砖），是在费米指挥之下，在芝加哥体育场大学的看台下面建造起来的，于 1941 年 12 月 2 号开始运行。当然，链式反应在减速堆中进行的速度很慢，产生的能量既不能用于军事目的也不能用于和平目的。但这里有一个诀窍：当裂变链式反应在 U^{235} 核中进行时，虽然 U^{238} 核由于减速剂的作用已被排除在留卡伦* 的宴会之外，但还是有些中子被饥饿的 U^{238} 吞吃了。当 U^{238} 核吞下一个中子后，发生的情况由如下的核反应方程决定：



$$_{92}U^{233}+{}_0n^1\longrightarrow{}_{92}U^{239}+\gamma$$



$$_{92}U^{239}\longrightarrow{}_{93}Np^{239}+e^-$$



$$_{93}Np^{239}\longrightarrow{}_{94}Pu^{239}+e^-$$

Np 和 Pu 代表镎和钚，是原子锅炉中产生的两种“超铀元素”。虽然镎只是反应过程中的一个暂时阶段，但钚乃是确实存在的：它的性质与 U^{235} 相同，只是更强烈得多。当它被中子打中时，很容易就被打破，裂变时伴随有大量的二次中子的发射。当然，也是最重要的，钚有着与铀不同的化学性质，当锅炉中的烹煮过程过去时，它很容易就能（他们这样说）与其余的铀分离开来。

现在美国裂变物质的生产每年共有 x 吨，相比之下苏联每年生产 y 吨。

---

* 译注：留卡伦 Lucullan，古罗马的富翁，以宴会豪奢著称于世。

裂变炸弹与反应堆

在关于裂变链式反应的所有讨论中，最重要的概念是临界体积。当一次裂变过程在给定的样品 U^{235} 或 Pu^{239} 中发生时，要从核破裂的地点发射出几个裂变中子(平均每个铀核发出 2.5 个，每个钚核 2.9 个)。为了进入另一个核子，裂变中子在物质中所要通过的平均距离约为 10 厘米。所以，如果有关样品的尺寸小于这个距离，大多数裂变中子就会穿出样品的表面，在获得引起另一次裂变并产生更多中子的机会之前就跑掉了。因此，如果样品的尺寸太小，链式反应就不能继续进行下去。样品越大时，其内部产生的裂变中子在逃出表面前就有机会与另一个核发生碰撞而引起裂变的数目也越多，如果样品的大小合适，样品内能产生另一次裂变中子的数目就变得足够的大，使反应速度随时间迅速增大。对给定的裂变物质来说，引起后续裂变过程的中子所占的百分比若是高到足以保证裂变反应继续进行，此时的样品尺寸称为该物质的临界体积。因为对于钚每次裂变产生的中子数比 U^{235} 要多，所以钚样品的临界大小比 U^{235} 的要小，原因是前者能担负得起更多的逃出表面的中子损失。

要产生一次核爆炸，我们就要能在足够短的时间内使裂变物质的体积大大超过临界体积，这段时间要短到不让链式反应发展到很大的强度。例如，我们可以把一块只有临界体积一半大的裂变物质抛入另一块这样大的裂变物质中，抛的速度足够高，使它们在达到完全的“会合”之前，链式反应不致于发展到显著程度。还有许多其它的巧妙的(但也是分级的)办法可以达到同样的目的。

如果我们想要让裂变链式反应在可控条件下进行，以利用它来生产动力，我们就必须尽可能地始终保持样品体积接近临界体

积。应当记住，核链式反应就其本质说来乃是一种爆炸性反应，想让它以不变的速度进行下去的任何尝试都好比是用TNT炸药当燃料来点炉子一样。但在事实上，这还是可能做到的，而且发生事故的可能性很小。利用含有吸收中子的物质（例如硼）做成的“控制棒”就可以达到目的，这种棒在中子产生的速率低于或高于所希望的程度时，可以自动从参与反应的裂变物质中钻好的孔槽里推进去或拉出来。

今天，核反应堆在缺少煤和石油的国家里正在成功地用来作为动力堆，英国就是这样的国家；它还用来做为船舰的动力，例如美国用它造了“原子”潜艇，苏联用它造了“原子”破冰船。

热核反应

多少年来，天文学家和物理学家一直在奇怪是什么东西使太阳（以及所有其它的星体）发光的。显然，普通的“燃料”是不行的，因为即便太阳中的物质全是最好的航空汽油，它也无法从古埃及金字塔的时代延续到今天。大约在一百年前，德国的赫姆霍兹和英国的开尔文勋爵曾提出，太阳之所以能维持它光和热的辐射，是由于它本身在缓慢地收缩。计算表明，太阳从原来很大的体积收缩到现在的直径所释放的能量足以维持其辐射达几亿年。但是，对太阳系的年龄所做的最新估计表明，这个大数字还是不够大，太阳发光至少已经有了几十亿年。解释太阳这样长寿的唯一办法就是假设它的能量是由某种核反应得来的。1929年，英国天文学家阿金森和奥地利物理学家豪特曼凑在一起研究这个假设是否正确。他们的想法是，灼热的太阳内部原子之间的热碰撞会引起某些核反应，这些反应进行的速度快到足以提供必要的能量。英国天文学家爱丁顿爵士的研究表明，太阳内部的温度必须高达两千

万度，这相当于每个粒子大约有 4×10^{-9} 尔格的热运动能量。这个能量要比平常在人为核嬗变的实验中所用的原子射弹的能量大约小几百倍，但是我们必须考虑到，人为加速的核射弹很快便失去它们的初始能量，只有很少的机会能击中靶核引起反应，而太阳粒子的热运动却是不断继续下去，而且永远不间断相互碰撞的。利用波动力学中穿透核势垒的理论（这个理论当时还只提出了一年），豪特曼和阿金森证明了，在太阳内部达到的温度和密度下，氢核（质子）和其它轻元素的核之间发生的热核反应所释放的能量足以能解释观测到的太阳辐射。这个理论在科克罗夫特和沃尔顿关于用质子作射弹引起人为核嬗变的实验之前就已经提出了，当时对各种轻元素核在质子轰击下的情况所知道的可靠知识还很少。豪特曼和阿金森那时就提出，有些轻核必须具有俘获质子的能力，并能抓住它们，保持相当长的时间。在俘获第四个质子后，就会在这种"质子阱"的原子核内部形成一个 α 粒子，而射出这个 α 粒子时就会释放大量的核能。他们姑且把自己的论文命题为"怎样才能从势锅中煮出氦核？"，*该文发表在 1929 年的德国杂志"物理学期刊"上，但这个题目被一个没有幽默感的杂志编辑换了个比较普通的标题。

大约十年后，关于轻核在质子碰撞下的转化已经积累了足够的知识，阿金森和豪特曼的"质子阱的核"已被判明是炭核。美国的贝特和德国的魏扎克分别独立地提出了所谓的**碳循环**，如图 VIII-14 所示。在这一系列核反应中，有四个质子依次被碳核所俘获，其中两个转变为中子后，便以 α 粒子的形式发射出来。总的循环周期是六百万年，一个周期中所释放的能量共为 4×10^{-5} 尔格。因为根据目前关于太阳的化学成分的资料，每克太阳物质中约含

* "Wie Kan Man Ein Helium Kern in ein Potencial Topf Kochen?"

0.0001 克的碳（5×10^{18} 个碳原子），所以碳循环的总的能量释放速率等于每秒每克 1 尔格，这总共只有太阳内部所必须有的能量产生率的 1%。

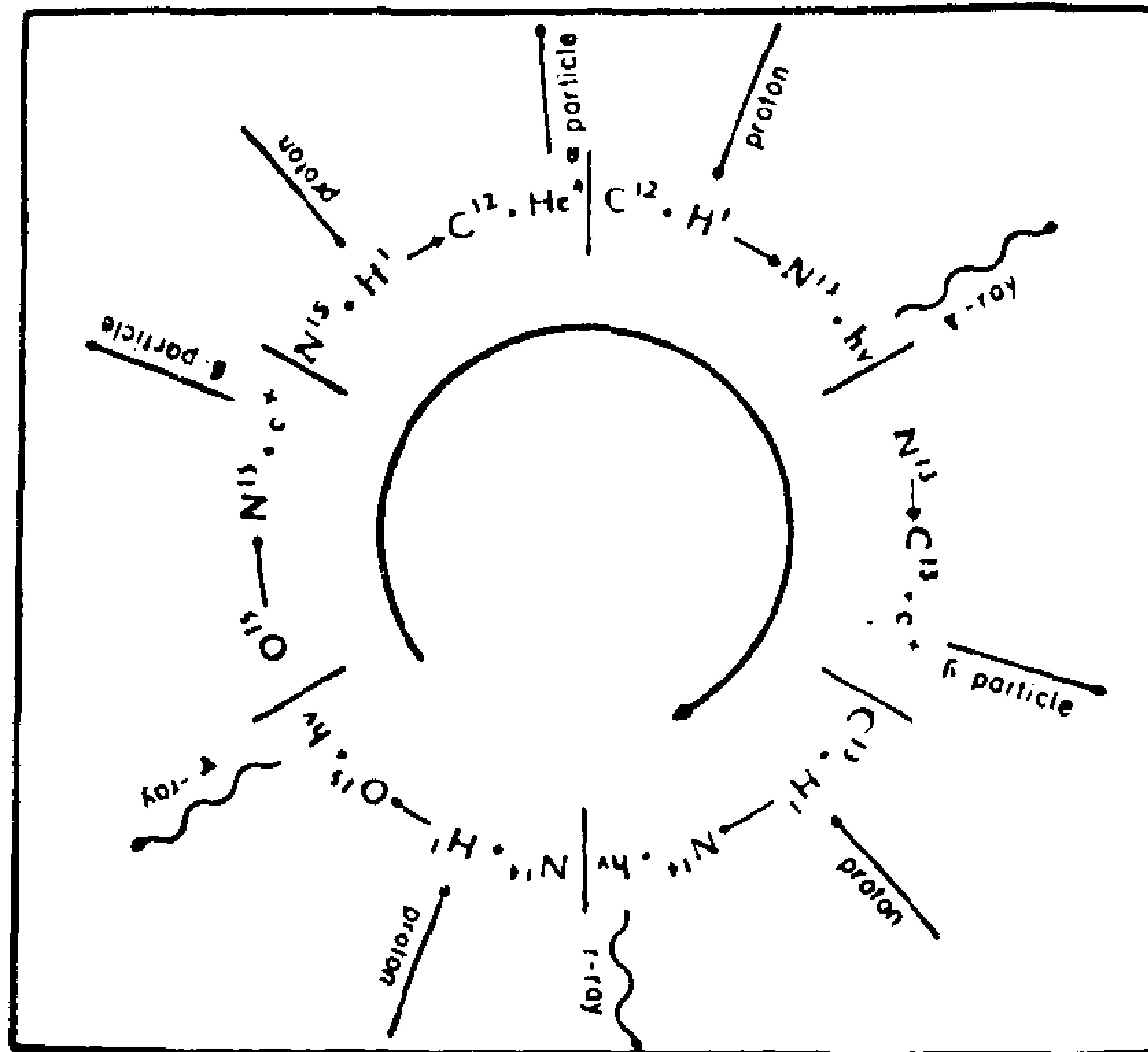
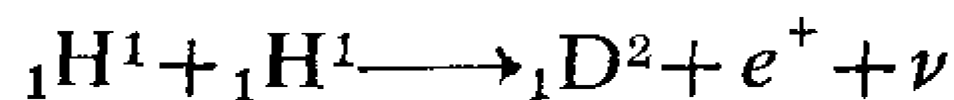
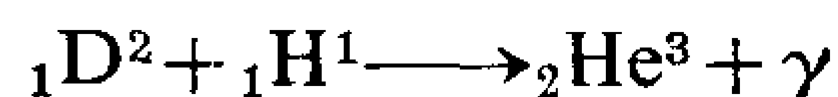


图 VIII-14　星球中的碳循环是产生热核能的原因。

与此同时，克里奇菲尔提出了另一个过程，他当时还是华盛顿大学的研究生。他的想法是，如果在质子与质子的碰撞中有一个质子发射了一个正电子而变为中子，这就可以形成一个氘（重氢的同位素）核。通过随后的反应，氘就会变成氦，因此最后达到与碳循环同样的结果，但速度要快得多。在这个所谓 H–H 过程中，发生的反应是：



$${}_1H^1+{}_1H^1\longrightarrow{}_1D^2+e^++\nu$$



$${}_1D^2+{}_1H^1\longrightarrow{}_2He^3+\gamma$$



$${}_2He^3+{}_2He^3\longrightarrow{}_2He^4+2{}_1H^1$$

在两千万度的温度下，这个反应需要用 3×10^9 年，每个质子

释放出 4×10^{-5} 尔格的能量。因为太阳物质中氢含量约占一半(每克含 2×10^{23} 个原子),所以总的能量释放率为每秒每克 100 尔格,这与观测值符合得很好。

然而,太阳中 H-H 反应比碳循环占优势的现象并不是普遍的规律,在许多星球中是相反的。要点在于,这两组热核反应对温度有着不同的灵敏感度,碳循环的速率与 T^{17} 成正比,而 H-H 反应只按 T^4 的方式变化。因此,在一些比太阳更亮的星球中,例如天狼星,其中心温度较高,所以碳循环就比 H-H 过程占上风。另一方面,在比太阳暗淡的星球中(多数星球都属于这一类),能量的产生就是完全依靠 H-H 反应了。

要是读者把太阳内部产生能量的速率与普通用电器(例如电咖啡壶)产生热量的速率比较一下的话,他就一定会感到非常惊奇。每秒每克 100 尔格的能量大约相当于每秒每克 2×10^{-5} 卡的热量,在这样产生热量的速度下,要烧开一克冷水就得用去 5×10^7 秒或一年半的时间! 因此,如果电咖啡壶中发热机构的工作效率是与太阳内部热核反应的效率相同的话,我们就得等上好多年才能把水烧开,当然,还得假定咖啡壶是完全绝热的,没有能量损失。太阳中低得如此可怜的热量产生率为什么使它这样热呢?原因就是太阳太大了。事实上,因为产生的总热量与体积成正比(即与 R^3 成正比),而热的损失与表面积成正比(即与 R^2 成正比),所以尽管太阳内部单位体积的热量产生率很低,很大的体积还是可以变得很热。

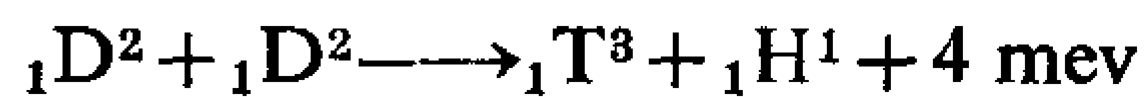
从以上讨论中可以清楚地看出,不论是碳循环还是 H-H 反应(它们给星球提供的能量照亮我们的宇宙),对于想利用核能来为自己服务的野心勃勃的 Homo sapiens (拉丁文,意即聪明的人)来说都是合适的。解决这个问题的关键是靠重氢同位素氘 D^2,它

是美国化学家尤里发现的，再就是靠更重的氢同位素氚 $_1T^3$。氘在自然界中是存在的，虽然数量较少，每三千个水分子大约只有一个氘分子。由于同位素分离技术的发展，氘的价格已经从昂贵的法国香水的价格降到了便宜的威士忌酒的价格，海洋中可有的是水。氚是不稳定的同位素，它在自然界中不存在(除了大气中由宇宙射线产生的极微量的氚以外)，所以必须以很高代价在原子反应堆里制造，用它来做基本燃料就太昂贵了。但是为了在氘中激起热核反应，用它来做“核点火剂”是有利的。

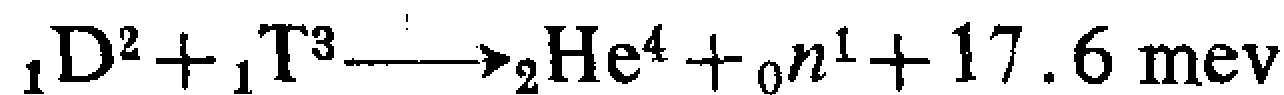
重氢同位素之间的可能反应是：



$$_1D^2 + {}_1D^2 \longrightarrow {}_2He^3 + {}_0n^1 + 3.25 \text{ mev}$$



$$_1D^2 + {}_1D^2 \longrightarrow {}_1T^3 + {}_1H^1 + 4 \text{ mev}$$



$$_1D^2 + {}_1T^3 \longrightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1 + 17.6 \text{ mev}$$

它们的有效截面可根据隧道效应理论算出，如图 VIII-15 所示。因此，为了在重氢同位素之间产生热核反应，我们所要做的只是把它们加热到几亿度的温度。洛斯阿拉莫斯实验室的科学家们在 1952 年 11 月 1 日做到了这一点，当时他们在太平洋的一个珊瑚岛 Elugelab 上爆炸了第一颗热核炸弹，把这个岛变成了一个一英里宽、约 200 英尺深的大水坑。他们利用强大的原子弹爆炸来压缩适当数量的重氢而使其变热，得到了这一结果。

但是，如果我们想要在受控的条件下来进行热核反应，把它们释放的能量用于建设目的而不是破坏目的，问题就复杂得多了。显然，在此情况下，发生热核反应的物理条件要有急烈变化。首先，反应应在极低的密度下进行，以避免在几百亿度高温下所会形成的极高气压。事实上，在这样的温度和大气密度下，氘气的压力大约会高达每平方英寸 1 亿磅，没有任何容器能够装得住它。图 VIII-16 中的曲线表示纯氘和氘—氚混合物在不同气体密度下的

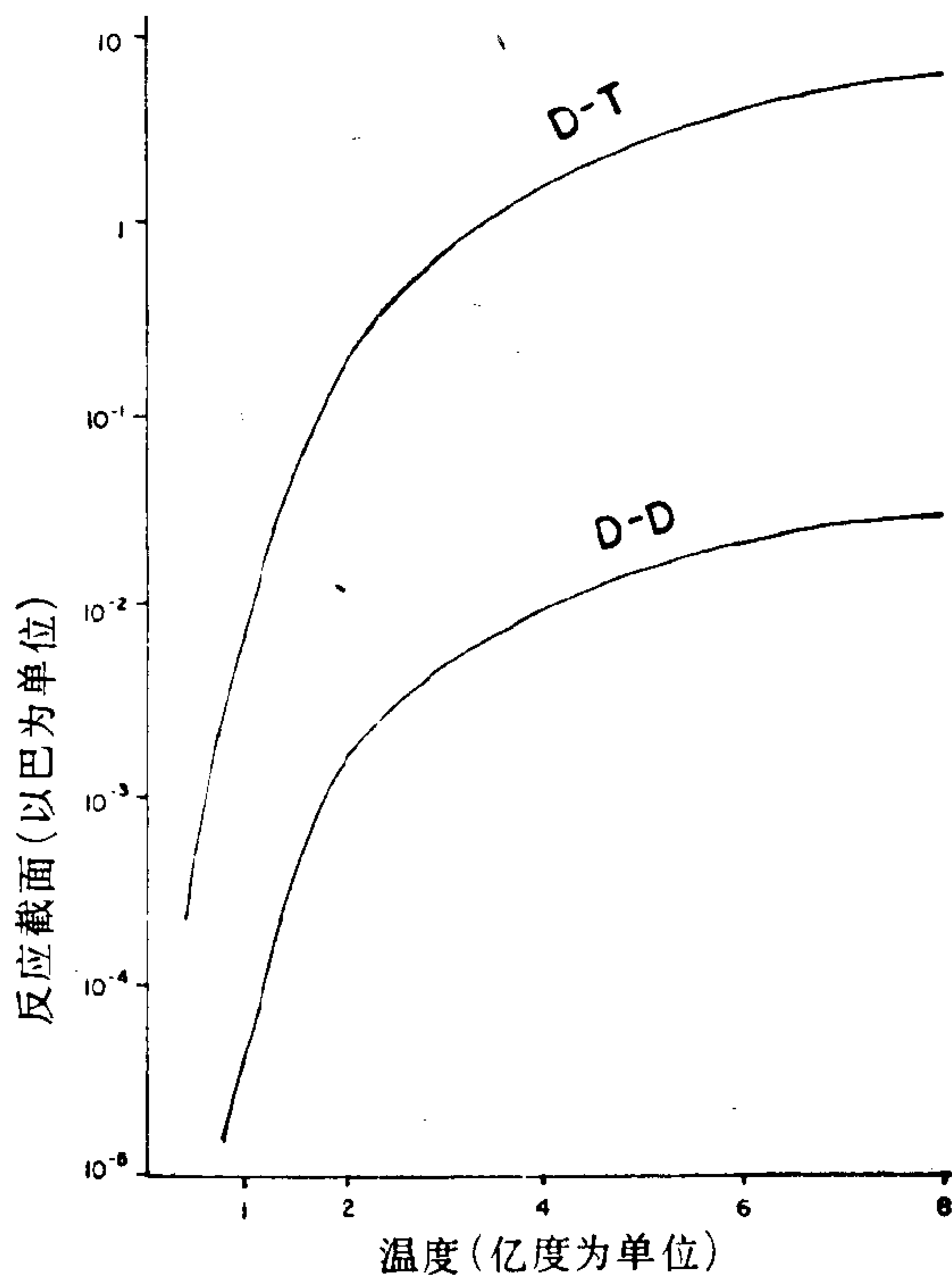


图 VIII-15 D-D 和 D-T 的反应截面与其热能量的函数关系，热能量用绝对温度表示。

热核能量产生率。从图中可以看到，要得到每立方厘米约 100 瓦的能量产生率(与现在的裂变反应堆差不多)，氘的密度可以低到大气密度的万分之一，大约相当于我们在实验室里所能产生的最高真空度。第二个问题是要使这些稀薄的灼热气体离开容器壁，否则由于热量传入器壁的过程，会很快降低氘气的温度，乃至低于热核反应所要求的最低温度。

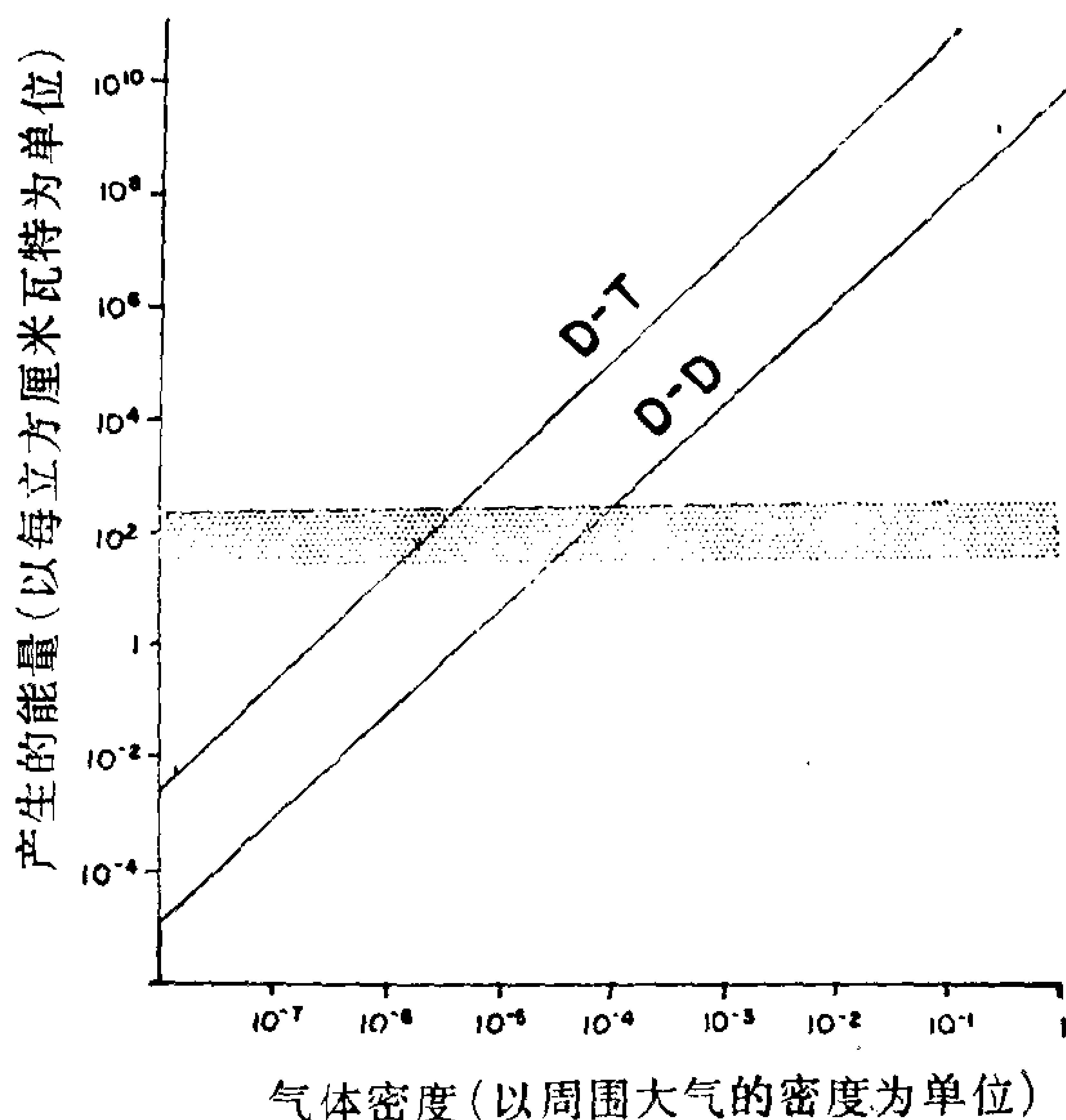
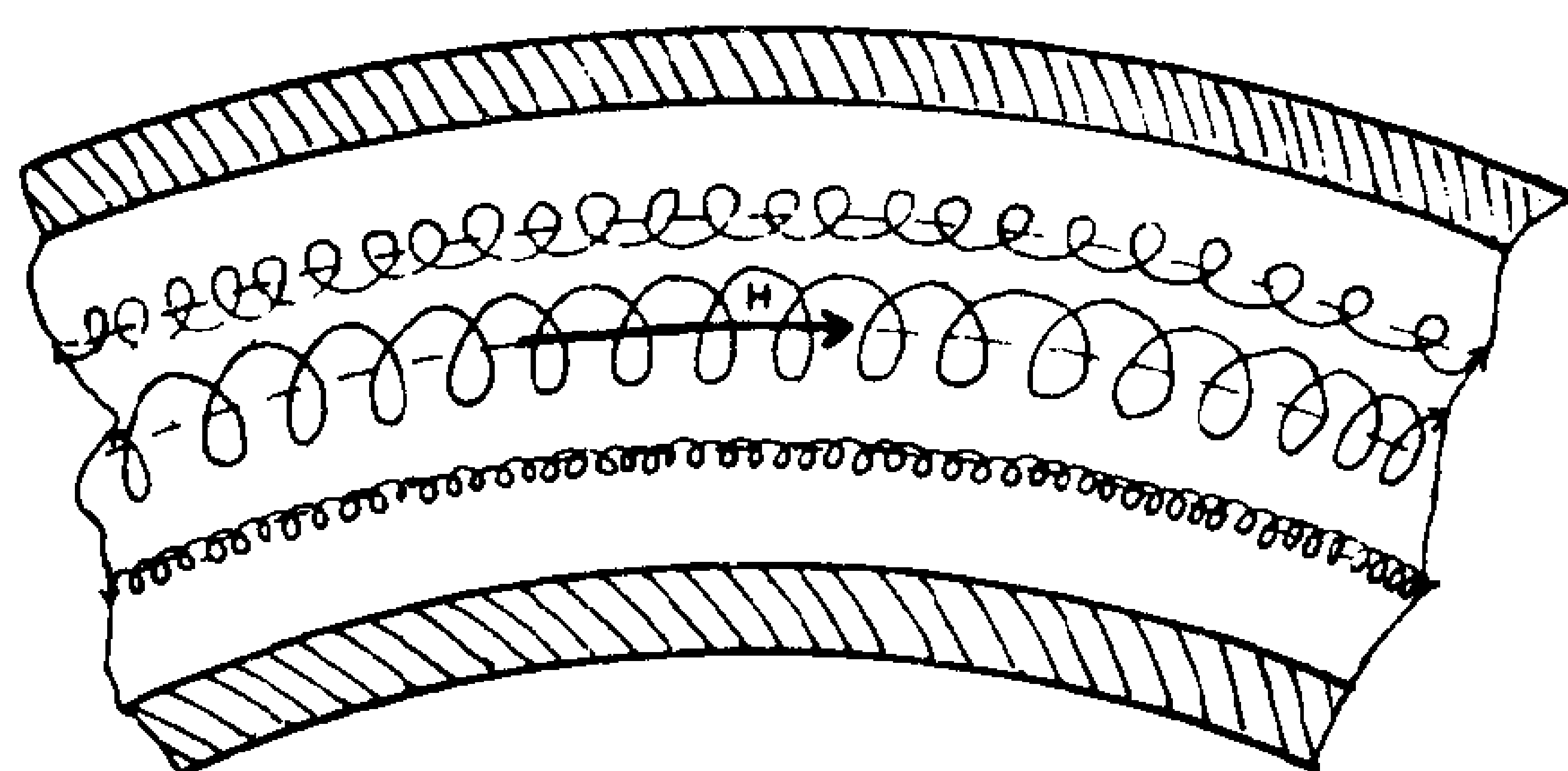


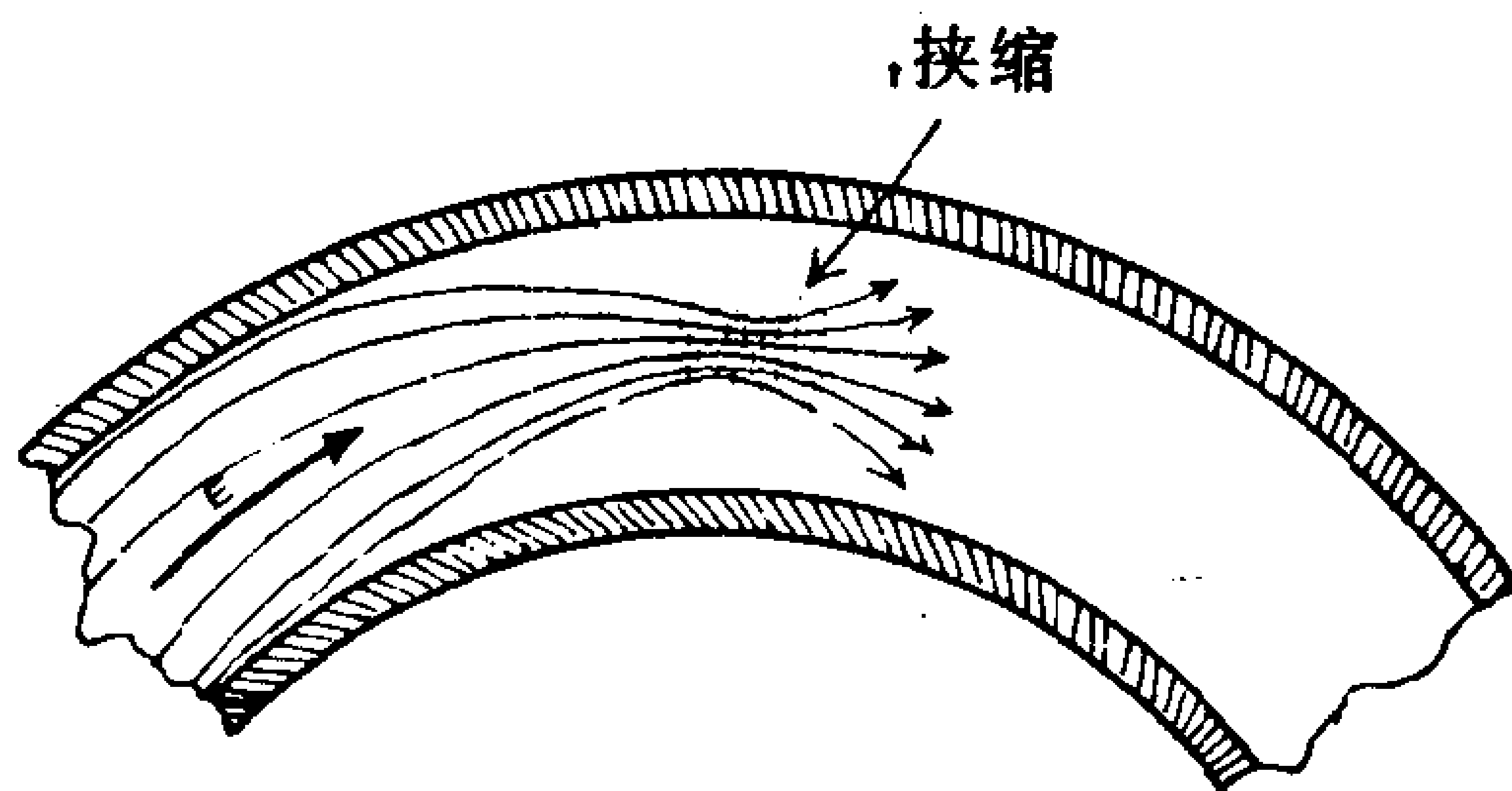
图 VIII-16　在 7×10^{9}K 的温度下（差不多是太阳内部温度的两倍），各种气体密度的核能释放率。图中的阴影区表示现有铀反应堆和钚反应堆的能量产额。

有几种方法可以做到这一点，其基本原理都是利用强磁场。在热核反应所要求的极高温度下，管中的氘气将完全被电离，变成带负电的电子和带正电的氘核。（现在把物质的这种状态称为"等离子体"。）我们知道，当带电粒子在磁场中运动时，它要受到一个垂直于其运动方向和磁场方向的力。这个力迫使粒子绕磁场方向作螺线形运动，如图 VIII-17 a 所示。这样，若在管中形成一个强的轴向磁场，我们就可以有效地防止自由氘核和氚核靠近管壁。如果做到这一点，在管子中螺线形前进的粒子之间的碰撞就可能产生 D-D 或 D-T 反应，并放出核能和大量的中子。当然，为了激起这一过程，管中气体首先必须靠某种外界力量加热到很高的

温度。



a.



b

图 VIII-17 现在正在研究的两种实现受控热核反应的主要方法。普林斯顿的“Stellarator”(仿星器)和洛斯阿拉莫斯的“Perhapsotron”(或许器)。

第二种可能性是利用管中暂短而强烈的放电所引起的磁力。大家知道两个平行电流沿同一方向流动时，会因磁场的作用而互相吸引，所以在电流足够强的情况下，管中的气体(确切地说是等离子体)将有自动离开管壁的趋势，而被压缩成一个沿管轴的狭窄喷注。看看图 VIII-17 b 就可以明白这种所谓的“挟缩效应”是怎样起作用的。与前面讲过的方法相反，这种“挟缩效应”的装置就

象汽车引擎那样是急速动作的，但是它有一个优点，就是管中的气体由于放电而自动变热，不需要外界来加热了。已经估算出，几十万安培的电流持续几个微秒时会产生足够强烈的"挟缩效应"，能在氘中引起热核反应。上述方面的工作现在正在世界各地的许多实验室进行着，完全有可能在不久的将来就会解决受控热核反应的问题。*

介子和超子

三十年代初，物理学家们都为物质只由少数几个粒子构成而感到高兴。构成原子核的质子和中子，包在外面的电子，还有——哦——中微子，是这个时期产生的问题。但在 1932 年，日本物理学家汤川秀树发表了一篇文章，它使每个研究原子核内聚力本质的都感到头疼。汤川秀树认为，核力的产生是由于有一种新粒子在质子和中子之间连续不断地交换。即使有可能，用简单的方法来描述"交换力"这个复杂的概念也是很困难的。最好的方法也许是设想有两条饿狗在抢一根肉骨头，彼此咬住一口不放，都想占有这根美味的骨头不断地从一条狗的嘴里传到另一条狗的嘴里，抢来抢去，结果两条狗变得扭在一起分不开了。汤川秀树的观念就是，核子之间吸力的产生也是由于它们为了占有一种新的美味粒子而进行着类似争夺的结果。这种新粒子可能是电中性的，也可能带正电荷或负电荷，这情况下的交换过程看起来就好象图 VIII-18 所示的情况。

汤川秀树曾指出，为了说明观测到的核力性质，应当假定这种

* 译注：二十几年来，在实现受控热核反应的研究方面，世界各国都投入了巨大的人力和物力，取得了相当大的进展。目前性能最好的是"托卡马克"装置，已接近点火条件。

新粒子有着介于质子和电子之间的质量，约比前者轻 10 倍，比后者重 200 倍。当时谁也不相信有这种粒子存在，直到两年以后，加利福尼亚工艺学院的物理学家安德尔森在大气上层落到地面的宇宙射线中发现了具有这种质量的带正电和带负电的粒子存在时，人们才暂且把这种粒子称为“汤川子”。

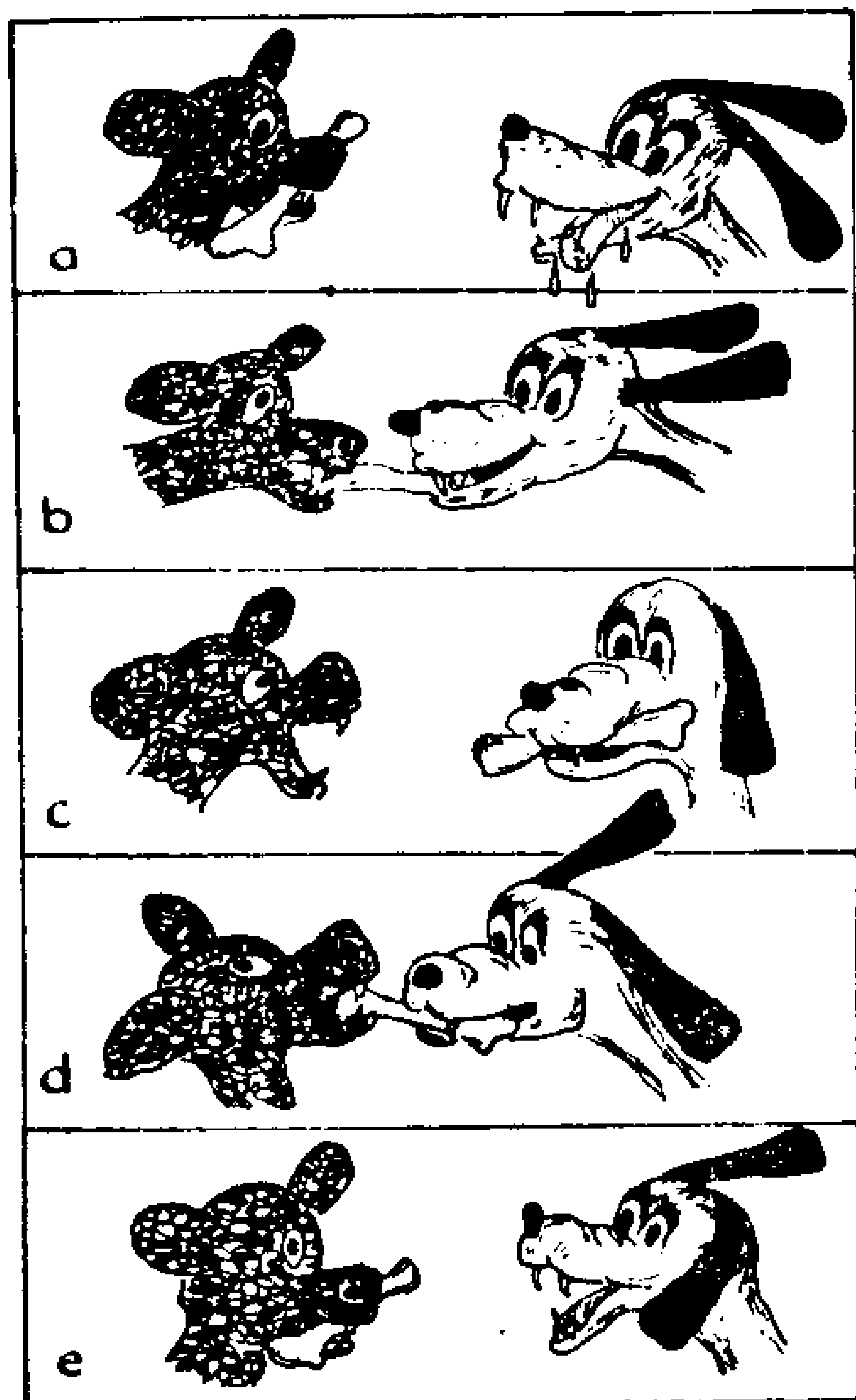


图 VIII-18 介子（骨头）在两个核子之间交换

从新粒子发现以后，它的名字曾几经周折。它有时被称为“重电子”，有时被称为“轻质子”，后来有人提议叫做“mesotron”，这个名称来源于希腊字 *mesos* (μεσος)，意思是“介于两者之间”。但是，海森堡的父亲是一位古典语言学教授，他反对把“tr”这两个字母放在名称里。确实，“electron”（电子）这个名称也是来源于希腊字 *electra*（意为琥珀），但希腊字 *mesos* 中并没有“tr”两个字母。这样，汤川秀树粒子的名称最后就被定为“*meson*”（介子），尽管有一位法国物理学家反对，他不想把新粒子的名称与 *maison*（法文意为“家庭”）混淆起来。

一开始，介子就使物理学家非常头疼，因为由于它们在大气中要被吸收，这里似乎有些什么东西搞错了。对于这种能量极高（好几十亿电子伏）的粒子，可以预计它们在不同物质中的吸收只与它们所通过的物质总量（质量）有关。确实，对这样高能量的快粒子，

与之碰撞的原子中的所有电子都可以看成是自由的电子（参看关于康普顿效应的讨论），有影响的只是电子数，而不是它们与各个原子核结合的方式。因此，如果我们在一个高山的顶上和山底测量宇宙射线束强度的话，强度之差一定仅仅取决于从山底直到山顶之间的空气柱的重量。若两地气压计的读数之差——比如说——是 100 毫米水银柱高，则空气柱的重量便等于 100 毫米水银柱高的重量，因此宇宙射线在 100 毫米水银柱高中的吸收一定与从山顶到山脚之间空气的吸收相同。在宇宙射线电子的情况下，这个规律完全正确，但对新发现的粒子来说似乎就不那么有效了。

这方面有一个重要实验是 1940 年由罗西等人在丹佛（海拔 1616 米）附近埃文斯山顶的爱克湖（海拔 3240 米）上完成的（图 VIII-19）。两地的气压之差是 14.5 毫米水银柱高，或相当于两米

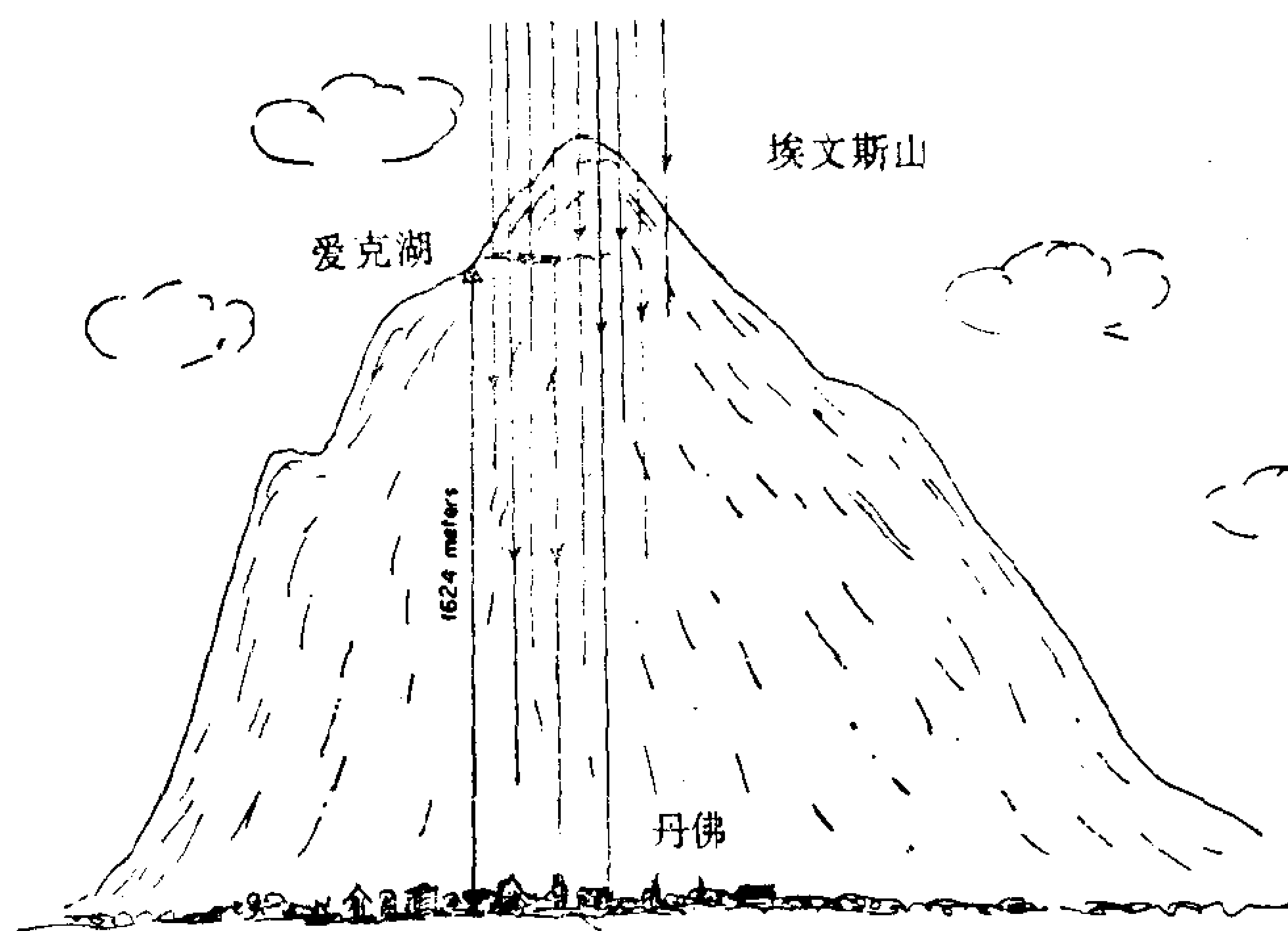


图 VIII-19　从爱克湖到丹佛途中的介子衰减

的水柱高。他用了两个相同的介子计数器，一个放在丹佛，另一个

放在山上,放在山上的计数器沉下湖面下两米深处*。因为在这情况下湖水产生的应当与丹佛街上到山顶湖上之间的空气层产生的吸收相同,所以两个计数器应当显示出同样的结果。但是,实验并没有证实这个预言,放在丹佛的计数器读出的介子数总是少得多。唯一可能的解释就是除了大气吸收外,还有别的原因使达到地面的介子数减少。费米提出了一个想法,认为这个结果是由于介子本身的不稳定性。事实上,如果介子在飞行中分裂,通过物质层的相对介子数便与它们飞行的时间有关。因为介子下落到丹佛一定多飞过了 1624 米,它们实际上是以光速飞行的,所以这段路程所需飞行的时间是 $\frac{1.6\times10^5}{3\times10^{10}}=5\times10^{-6}$ 秒。从这个数字以及观测到的地面强度的减少值,就可以算出介子的半寿命,结果表明介子的半寿命与它们的速度有关。对于能量为 250 兆电子伏的特快介子,寿命约为 2×10^{-3} 秒,而对于较慢的能量只有 100 兆电子伏的介子,观测到的寿命只有 5×10^{-4} 秒。这些观测结果首次从实验上证实了爱因斯坦的时间膨胀,实验结果极好地符合公式 $\Delta t'=\frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$。在随后的实验中,人们又测量了介子在一块吸收物质中静止下来后的寿命,结果发现寿命更短了,短到 2.5×10^{-6} 秒。如果宇宙射线中的快速介子具有这样短寿命的话,它们在大气高层就会全都衰变了,我们在地面也就永远不会观测到它们!

当介子"死去"时会发生什么情况呢?这只能靠介子及其衰变产物的轨迹照片来回答。在宇宙射线介子这类具有强穿透能力的粒子情况下,没有必要使用云室,云室实在太笨重了,没法放进气球或火箭中。这类研究中的标准方法是用厚层的乳胶片,把许多

* 实际实验中用了一块厚度相当于两米水深的铁板,如果直接用这个美丽的湖的湖水,那就富有诗意了。

这样的乳胶片堆放在一起，当高能粒子通过它时，就会在路径上使乳胶片中的颗粒感光。把洗出的底片放在显微镜下观察时，就可以看到一些长长的变黑的颗粒，指示出粒子的路径。照片 VIII(上)中的一组厚乳胶片显示出一系列事件，我们现在只从中选出了照片中的最后几条径迹。从前面数的第二条（从底部通到左上方的一条)是介子的径迹，数一数径迹每单位长上感光的颗粒数目就可以确证这一事实。最后一条(左边从顶部通向下的一条)是一介子径迹末端产生的普通电子的径迹。电子向相反方向抛出的事实，证明还一定有一个或多个粒子参与了衰变过程，并向左方飞去了。看不到有别的什么径迹，这件事证明这些粒子一定是电中性的，仔细研究了这些径迹的方向和能量之后，得出的结论是，事实上另外还有两个粒子，它们都是我们的老朋友中微子。因此，介子的衰变可用下式来描述:

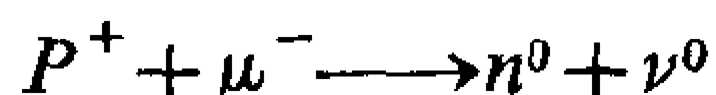
$$\mu^{\pm}\longrightarrow e^{\pm}+2\nu$$

式中“+”和“-”对应于带正电和带负电的介子。因为介子的质量是电子质量的 206 倍，电子当然是一个电子的质量，而中微子实际上没有什么质量，所以还有 205 倍的电子质量尚待解释。根据爱因斯坦的质能等价原理，多余的这部分质量将转化为 100 兆电子伏左右的能量，在衰变中形成的粒子之间分配。

介子首次被发现时，人们认为这些粒子是象冰雹似地散下来的，根据汤川秀树的交换现象理论，它们必定是核子之间产生内聚力的原因。但不久就弄清楚了，情况根本不是那么简单。困难在于讨论介子在一块厚的吸收物质中一路变慢时会如何行事的问题，这时人们预料正介子和负介子的命运是完全不同的。正介子要受到物质中带正电的原子核排斥，因而要变慢下来，它们将象一些二流子那样到处游来荡去，并在几微秒之内就衰变成快速的正

电子和一对中微子。这时吸收块中将射出高能的正电子，它通过吸收物质周围用来捕捉介子的大量计数器中的某一个，从而表明有一个正介子死亡。

但是，变慢了的负介子将被俘获在原子核的某个量子轨道上，而成为原子体系的一个临时成员。费米和泰勒所做的计算表明，这一俘获过程发生得极快，远在变慢的介子可能衰变之前就发生了。因为玻尔量子轨道的半径与粒子的质量成反比，所以这个介子轨道大约要比原子中最内层的电子轨道小 200 倍，因此被俘获的介子运动时与核表面离得很近，有些象一个人造地球卫星。介子一到轨道上，就面临两种可能性：它可能分裂成一个快速的负电子和两个中微子，这时放在吸收物质周围的计数器记录的便是一个负介子的死亡。但是，因为介子运动时距离核这样近，所以它也可能被核吞没。事实上，如果质子和中子之间的吸引力是由于介子在它们之间连续不断地交换的话，就一定存在如下的反应：



$$P^{+}+\mu^{-}\longrightarrow n^{0}+\nu^{0}$$

从核力的强度可以估计出这应当是一个极快的反应，大约只需 10^{-22} 秒。因为介子的自然衰变时间长达 10^{-6} 秒，所以实际上远在所有的介子自然衰变之前，它们早就被核吞没了，至多在 10^{16} 个介子中只有一个会有机会在被吃掉之前分裂成电子和中微子。因此，介子在物质中变慢时，应当没有什么负电子从物质中射出来。实验数据与这个结论完全不符。尽管从减速块中射出的负电子数目比正电子数少，对某些物质说来要少两倍，对另一些物质少 10 倍，但绝不是少了 10^{16} 倍！这意味着原子核对介子的贪吃程度要比汤川图象中为达到足够强的交换力所需要的程度小几千万亿倍。这样一来，我们现在该怎么办呢？人们预言了介子，发现了介子，但原子核对它们的兴趣却并不比狮子对干草的兴趣更大。

1947年，英国物理学家鲍威尔通过一只送到大气上空的气球拍了一张厚乳胶片，结果帮了大忙。底片显示出两条终端相连的径迹。一条属于普通介子的，质量为206，而另一条应当是由一个电荷相同而质量为273的粒子产生的。这个较重的粒子起初被称为"重介子"(象一个"中重量级拳师"一样)，但很快就被改称为π介子，而早先发现的"轻介子"则被称为μ介子。

后来的研究表明，一个正π或负π介子衰变为一个(正或负)的μ介子和一个中微子，衰变方程如下：

$$\pi^{\pm}\longrightarrow\mu^{\pm}+\nu^{0}$$

它们是由于起初的宇宙射线(主要是极高能量的质子)在大气上边与原子核碰撞而产生的，它们的半衰期很短(2.6×10^{-8}秒)，即使考虑了爱因斯坦的时间膨胀，也没有一个能到达地球表面。照片VIII中上面一张表示一个起初宇宙射线质子与底片中一些原子核碰撞时产生了一束π介子，其中一条径迹接着转变为μ介子和电子。虽然μ介子只有两种，即μ^{+}和μ^{-}，但π介子却有三种：π^{+}、π^{-}和π^{0}，最后一种分裂为两个高能辐射光子：

$$\pi^{0}\longrightarrow2\gamma$$

其半衰期只有10^{-16}秒。

在以后的年代里，发现了越来越多的各种粒子，阵雨般地落到物理学家的头上。先是出现了K介子，质量为965个电子质量，还有几种比质子重的粒子，它们被取名为"超子"。新粒子的名称、衰变方式和半衰期如表1所示，说不定在最近的将来还会发现更多的粒子。基本事件的照片变得越来越复杂了，正如照片VIII下面一张所表明的那样。这张照片是用一种所谓"气泡室"的新仪器拍摄的，在一定意义上说，气泡室的原理与云室正相反。它不是利用气体中形成的液滴，而是利用诸如液态氢这类液体介质中形成的

气泡。虽然我们关于基本粒子的实验知识增长得很快，但是我们企图解释这些事实的任何尝试却都碰了壁，这方面发展起来的所有理论迄今还只是纯唯象性质的理论。

表 1 物质的基本粒子性质

名称与符号	质量（以电子质量为单位）	平均寿命（秒）	衰变方式	质量（以137倍电子质量为单位）
Ξ粒子 $\Xi^{\pm}$	2585	10^{-10}	$\Lambda_0+\pi^{\pm}$	18.88
Σ粒子 $\Sigma^{\pm}$	2330	10^{-10}	$n+\pi^{\pm}$	17.02
λ粒子 Λ^0	2182	2.7×10^{-10}	$p^{+}+\pi^{-}$ 或 $n+p^{+}$	15.92
中子 n	1838.6	10^{3}	$p^{+}+e^{-}+\nu$	13.40
质子 p	1836.1	稳定		
τ 介子 $\tau^{\pm}$	966.5	10^{-8}	$\pi^{\pm}+\pi^{0}+\pi^{0}$ 等等	7.05
θ 介子 θ^{0}	965	10^{-10}	$\pi^{0}+\pi^{0}$ 或 $\pi^{+}+\pi^{-}$	
π 介子 $\pi^{\pm}$	273.2	2.6×10^{-8}	$\mu^{\pm}+\nu$	1.995
π 介子 π^{0}	264.2	10^{-16}	2γ	1.928
μ 介子 $\mu^{\pm}$	206.7	2.2×10^{-16}	$e^{\pm}+2\nu$	1.511
电子 $e^{\pm}$	1	稳定		
中微子 ν	0	稳定		

穿过观察镜

如果我们找到左脚的鞋，我们一定知道右脚的鞋是在床或沙发底下某个地方；对手套之类的许多其它东西，情况也是如此。但所有人的心脏是在左边，盲肠则在右边。生物学中有一个很基本的事实，就是构成每个生物——不论是一条阿米巴原虫，一个人，一条鱼还是一棵玫瑰树——的蛋白质分子都具有左旋对称性，右旋对称的动植物在地球表面上是不存在的。但很奇怪的是，每当有机化学家用各种元素来合成蛋白质时，他得到的总是50%左旋，50%右旋的分子。也许在我们星球上生命发展的早期阶段存在着两个生物界：一是右旋的，一是左旋的。它们彼此是不相容

的，甚至是互相抵触的，所以也许就进行了一场争夺战，结果有一方完全被消灭了。

但在正规的物理学中，镜象对称性原理(称为宇称守恒原理)总是满足的，对任何一个物理过程，总可以找到另一个过程，它看起来恰好象是前一过程的镜象。1956年，两位美籍中国物理学家杨振宁和李政道根据理论上的考虑提出，这个原理在基本粒子的情况下也许是不正确的。

我们在前面多次提到，基本粒子、特别是中子可以被看成是一些小小的陀螺绕着它们的轴旋转。这一旋转当然可以是顺时针的，也可以是反时针的，两种运动状态可以互相转化，只要把陀螺颠倒过来就可以了。中子衰变时射出的电子总是优先沿着其自旋轴飞去，人们一直以为电子以同等几率向两个方向射出的(好比穿过北极和南极的几率相同)。如果这是对的话，宇宙守恒原理就会得到满足，衰变中子的镜象就会与原来的中子完全相同，因为要使它们完全重合，只要把其中任何一个颠倒过来就可以了。但是，如果电子总是朝一个方向发射(图 VIII-20 a)的话，情况就变得完全不同了。事实上，当我们在镜中观察衰变中子的象时(图 VIII-20 b)，就会发现我们无法把它转到与原来的中子重合。如果在两种情况下电子都是向上发射，如图 VIII-20 所示，而这两个中子却是沿相反方向旋转。若我们(想象地)把镜象中子或把原来的中子颠倒过来，两个电子就会向相反方向发射。宇宙守恒就会遭到破坏，观察镜子另一边的基本粒子行为就不会与镜子前面完全相同了。

为了检验李杨假说，人们做了一个直接的实验，来看看中子的旋转方向与电子的发射方向之间是否存在着什么相关关系。实验是把一种β衰变的放射性物质冷却到极低的温度，并置入一很强

的磁场中。在这些条件下,热扰动实际上停止了,所有的原子都变得在同一方向取向,即沿着磁力线的方向取向。如果对中子旋转轴而言,原子有同样机会向两个方向发射电子,那么我们就会观测到有同样数目的电子飞向电磁铁的南极和北极。但是实验导致完全相反的结论,正如杨李所预言的那样,所有的电子都是沿同一方向飞行。此后,关于μ介子的衰变也得到了同样的结果。



图 VIII-20 中子衰变的镜象

这就是宇称守恒原理的失败,它证明基本粒子世界不是均称的。和"镜中"物理学对应的另一半世界在哪里呢?我们不知道。在基本粒子的基本性质没弄清以前,我们是不会知道的。

物理学的未来

从以上所述显然可知,物理学的未来在于进一步地研究和弄清基本粒子,虽然这方面的实验已有长足进展,但理论实际上停滞不前。二十五个世纪以前,狄谟克瑞特曾假定物质是一些分立的细小部分组成的,现在我们已经越来越相信这个假定的正确性了。

仅仅在大约半个世纪以前，我们才知道能量也具有"原子性"结构，这就是今天所说的量子。在最近六十年当中，物理学家已经知道如何把各种能量量子化。在电磁辐射的情况下，能量只能取 $nh\nu$，这里 ν 是振动频率，n 是整数。在简单的氢原子里，不同量子态的能量按 $\frac{1}{n^2}$ 的方式变化，这里 n 是整数。在其它更复杂的情况下，正确的答案由薛定锷方程和狄拉克方程给出。但对物质粒子的情况，我们实际上仍处于完全无知的状态。我们不知道为什么电子的电荷总是具有相同的数值：4.77×10^{-10} 静电单位。我们一点儿也不明白为什么粒子的质量是量子化的，有着如表 1 所示的相对数值。而且我们一点儿也不比狄谟克瑞特更强些，也是不清楚为什么物质应由极小的微粒所构成而不是真正连续的。

对上面这些问题的解答，便构成未来的物理学，但是最近几十年在寻找这些答案方面仍未迈出成功的一步，谁也不能预言何时可望得到突破。但是，尽管我们不知道正确的答案，考虑这类问题却不应受到责难。让我们以基本电荷 e 为例。大家知道 e^2 除以光速 c 和量子常数 h 的乘积是一纯数，即是一无量纲的常数，意味着无论我们是用厘米—克—秒单位制、英寸—磅—小时单位制还是用任何其它单位制来表示 e、c 和 h（只要所用的单位制保持一致），这个比值总是不变的。这个比值称为"精细结构常数"，因为在描述巴尔末谱线分裂为几个很近的成份时，便出现了这个常数，其数值等于 $\frac{1}{137}$。为什么是 137 而不是 75 或 533 呢？在物理学的公式中，数字系数总是具有某种数学意义。例如，如果我们研究单摆的周期 T、摆的长度 l 与重力加速度 g 之间的关系，则不论使用何种单位制，我们总会得到如下的公式：

$$T=6.283\sqrt{\frac{l}{g}}$$

6.283 这个数是什么呢？好，若是有人试图把它和数学中已知的各种数联系起来，就发现它实际上是 2π。的确，如果用理论力学中的方程来推导这个公式，就发现这个系数一定是 2π。同样，我们在用含有常数 c 和 h 的相对论性量子论的方程来推导基本电荷的表达式时，也应能得到结论说，比值 $\frac{hc}{e^2}$（精细结构常数的倒数）是由数值上等于 137 的数学表达式所给定的。目前谁也不知道如何去建立这样的理论，虽然我们不难猜到 6.283 等于 $2\times3.141\cdots\cdots$，但要猜出数字 137 是什么东西，那就困难得多了。

对恒星内部结构的理论曾做过无法估量的巨大贡献的爱丁顿爵士多年前曾作过一个大胆的尝试来解释 137。他的论证大致是这样的：我们生活在一个四维世界(x, y, z, ict)中，即 $4\times4=16$。让我们来建立一个矩阵，即一个方形的表，有十六行和十六列。让我们进一步假设这个矩阵对其对角线来说是对称的，即第 n 行第 m 列中小方块的内容与第 m 行第 n 列中的内容相同。我们能有多少个独立的小方块呢？这是不难算出的。整个矩阵共有 $16\times16=256$ 个小方块，除了 16 个属于对角线上的方块之外，剩下还有 240 个。因此，对角线两边每个三角形面积中将各有 120 个小方块。因为对角线两边的小方块完全相同，这就只剩下 120 个独立的小方块，加上对角线的 16 个，便成为 136 个。当爱丁顿第一次得到这个关系时，人们曾以为这个经验值是 136。只在几年之后，更精确的测量才把它增加到 137，这就迫使爱丁顿又发展了一个"修正理论"，要求再加上 1。

爱丁顿的这个想法遭到贝克、贝蒂和里兹勒等人的嘲弄，他们写了一篇短文发表在 1931 年 1 月 9 日出版的德国杂志《自然科学》上。这篇文章试图说明玩弄数学是多么危险，其文如下：

《关于零点温度量子理论的几点评述》

让我们考虑一个六面体晶格。其绝对零度的特征是它所有的自由度都被冻结，当然，电子绕玻尔轨道的运动除外。按爱丁顿的理论，每个电子具有 $\frac{1}{\alpha}=137$ 个自由度。除了电子外，晶格中还包含有同样多个质子。为了达到零点温度，我们必须赋予每个中子（即一个质子加一个电子）以 $\left(\frac{2}{\alpha}-1\right)$ 个自由度，因为有一个电子做轨道运动的自由度已被冻结。这样，我们就可以得到零点温度为

$$T_0=-\left(\frac{2}{\alpha}-1\right)\text{度}$$

假设 $\frac{1}{\alpha}=137$，就可以得到零点温度为

$$T_0=-273\text{ 度}$$

这与实验值符合得很好。可以看出，我们的结果与晶体点阵的特殊选择无关。

当然，上述137和273之间的数字关系纯粹是巧合，因为137虽然是一个真正的纯数，而绝对零度的数值却取决于一些不同的数，与我们是使用摄氏温标还是使用华氏温标或列氏温标* 有关。这篇文章发表后，柏林的一位物理学家告诉杂志的编辑说这是在戏弄人，于是编辑写了一封措辞激烈的信给文章的作者，当时他们正在剑桥工作。他们写了一封谦恭的复信，信中说作者对这一误会深表遗憾，但是他们深信，这篇文章会被看成是对**某些**物理学家立论方法的一篇模仿文字。这样，《自然科学》杂志的下一期就登了一则编者启事，希望读者们理解贝克、贝蒂和里兹勒的文章只是一篇模仿性文字。这下子可使得爱丁顿爵士大发雷霆了！

这里有一首上面提到过的福克当时写的诗**：

* 译注：列氏温标——从水的冰点到沸点分为80°。

** 由本书作者从原来的俄式德语译为英文。

137—1840

虽然我们可以随意测量，
弄得我们筋疲力竭昏迷乱讲，
137 对我们仍然是秘密一桩。
但是爱丁顿爵士能看得清爽，
他斥责了某些人的嘲弄诽谤；
他说这个数就是世界维数的度量，
难道事情真的就是这样?!——
这个世界包括你和我?
爱丁顿爵士也在其上?
这就是我们所闻所见的世界?——
唉，算了吧！他不过是开开玩笑随便讲讲！

• • •

好，这儿我自己有一个数
(为了针锋相对地闹一场)：
1—8—4—0，
我能证明它全然一样。
爵士先生，请坚持你那无力的计算，
从现在直到你升入天堂！
我的 1840 一定也适合我们已知的世界——
长此以往永远相当。
让这四个数字在我的大锅下闪光发亮吧！
使一切妖魔鬼怪胆战心慌！

• • •

这都是差不多三十年前的事了。但是直到今天，我们仍然不知道这个数为什么是 137，而不是什么别的数，也不知道爱丁顿的“解释”纯粹是一种巧合呢，还是有什么真理的成份在内。当然，我们可以把爱丁顿的努力归之为一种“数字学”，这个词在今天带有贬义，但有一个非常接近的词，叫做“数论”，它是纯数学中一大重要分支。在解决自然之谜的努力中，物理学家往往要求助于纯数

学，并且在许多情况下得到了它的帮助。当爱因斯坦想把引力解释为四维时空连续统的弯曲时，他发现黎曼的弯曲多维空间的理论在等着他。当海森堡在寻求某种不平常的数学方法来描述原子内部电子的运动时，非对易代数学已经为他准备好了。至今只有数论和拓扑学仍然是纯数学的学科，在物理学中没有得到什么应用。它们将来能不能被用来帮助我们进一步理解自然界之谜呢？

但是，如果回到明天的物理学问题，我们也许就会发现，解释基本粒子的质量要比解释它们的电荷更为困难。事实上，任何一个用速度 c、作用量 h 和一个数字来表示的质量公式中，也一定包括一个长度量。我们可以写成：

$$质量 = A \times \frac{作用量}{速度 \times 长度}$$

式中 A 是某个合理的数，如 1，$\sqrt{2}$、$\frac{3}{5}\pi$、$\frac{1}{2}\pi^2$ 等等。如果取 A 约为 1，作用量等于 h (6.55×10^{-27})，速度等于光速 c (3×10^{10})，要想求得物质粒子的平均质量，即介子的质量 (2×10^{-25})，我们就必须取长度等于 10^{-12} 厘米左右。当然，如果 A 不等于 1，比如说等于 2π $(\cong6)$ 或 π^2 $(\cong10)$，长度也许就可以小到 10^{-13} 厘米。这个数量级的长度在基本粒子物理学中是极为普通的。根据经典电动力学算出的“电子半径”是 2.8×10^{-13} 厘米，而两个粒子间核力开始起作用的距离已知是 1.4×10^{-13} 厘米。因此，几倍于 10^{-13} 厘米的长度在基本粒子问题中似乎具有重要的意义。

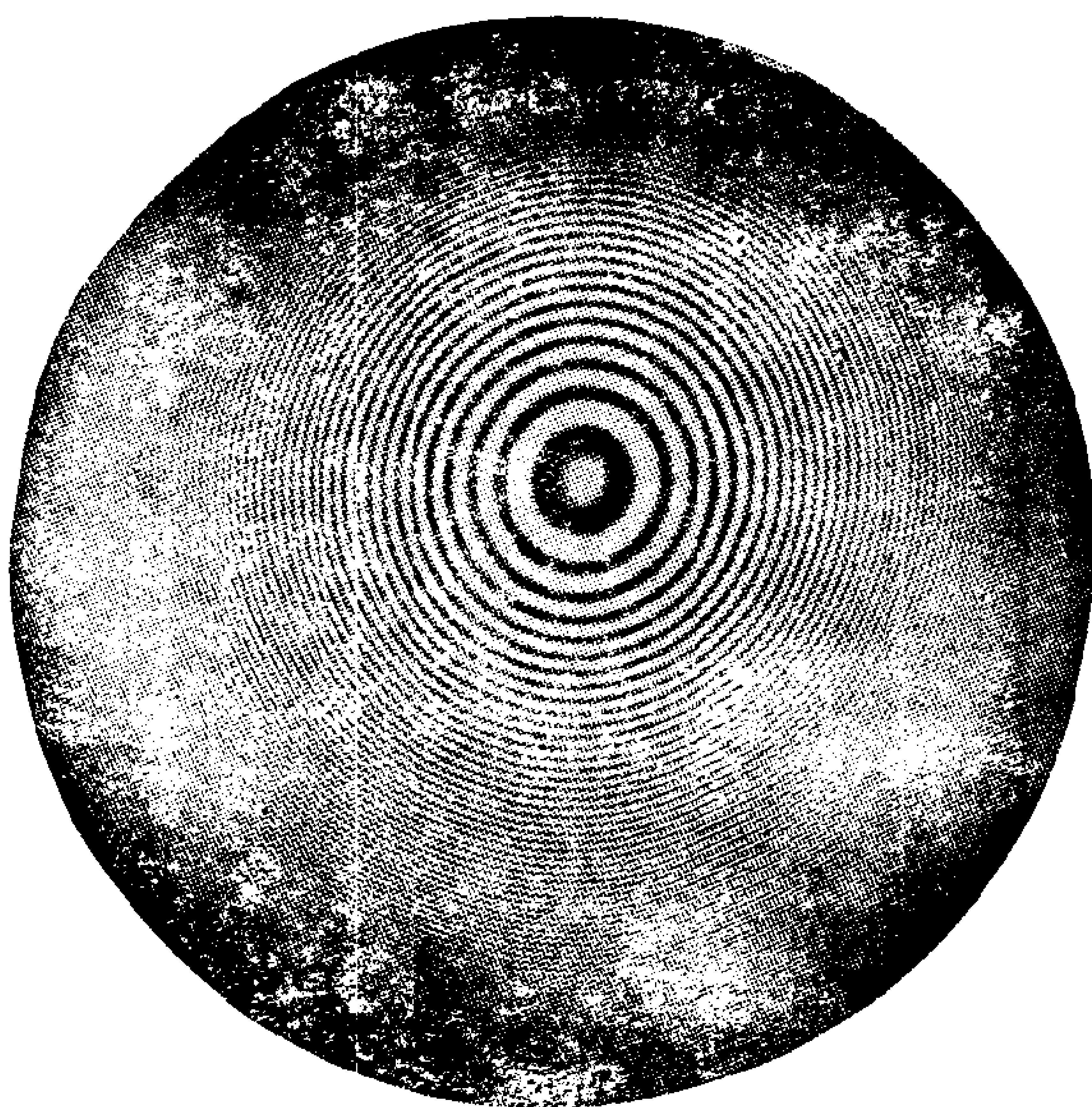
近几十年来，理论物理学家一直希望量级为 10^{-13} 厘米的长度（常称为 λ）能在理论的进一步发展中起着基本长度的作用，正如光速 c 在相对论中是最高可能的速度，h 在量子论中是最小可能作用量一样，λ 在未来的物质理论中注定也要起着最短可能长度的作用。可以说，它将是“一个数学点的直径”，谈论比它更小的

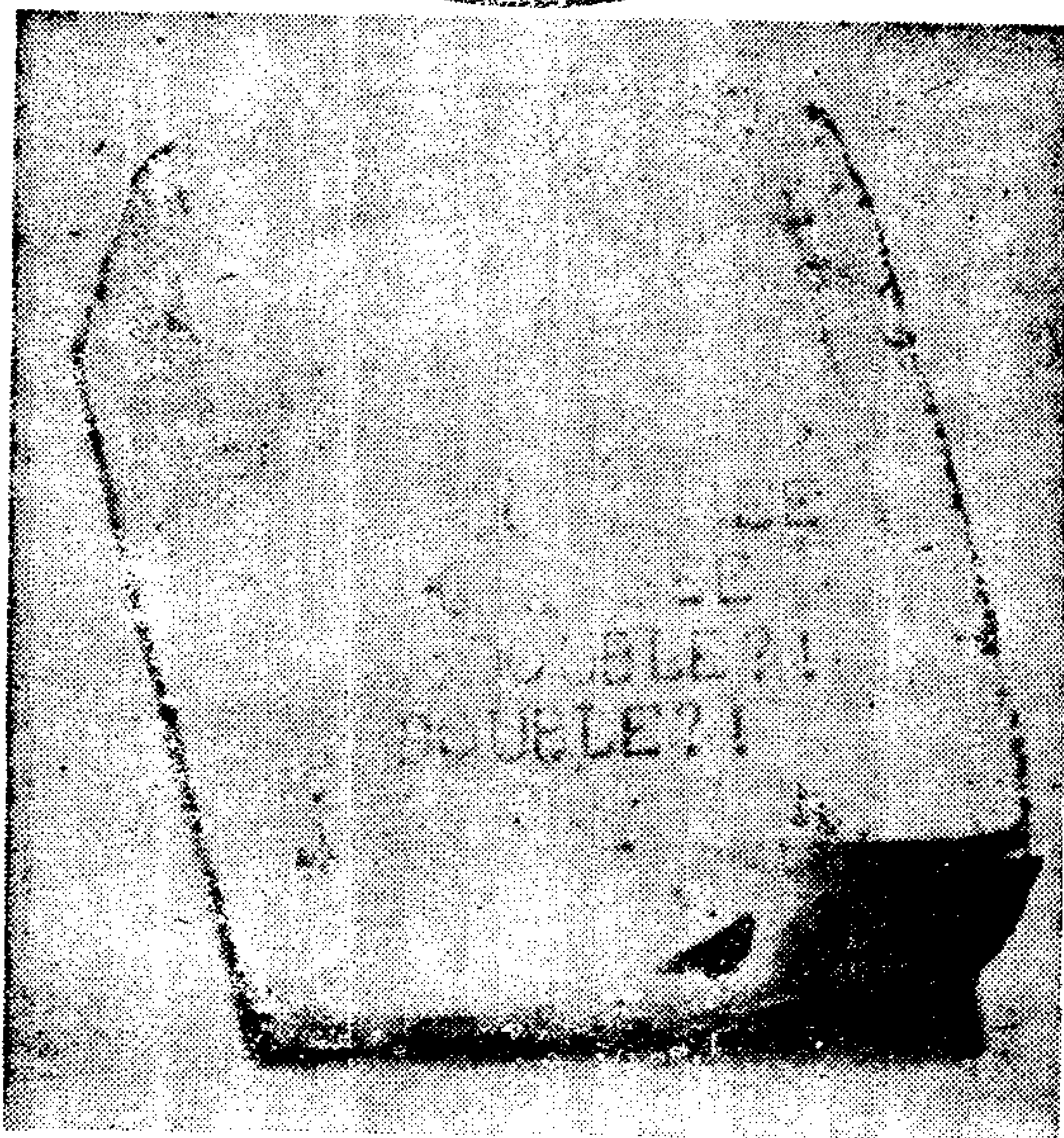
距离将没有任何意义。这种可能性是十分有趣的，也是激动人心的梦想，它可能变为现实，但是目前谁也不知道到底要等到什么时候。

这本书已经写得够长了，为了使它有个戏剧性的结尾，我们再讲一个在基本粒子领域中观测到的“数字学”关系。我们弄不懂 137 的含义，所以我们把所有基本粒子的质量都用 137 倍电子的质量来表示。结果如表 1 所示。我们看到，所有的数字都非常接近为整数，只有两个例外，它们接近为半整数。这也许是巧合，但是发生这一巧合的几率只有亿万分之一！而如果它不是巧合，它又有什么涵义呢？这个“神圣数字”的序列

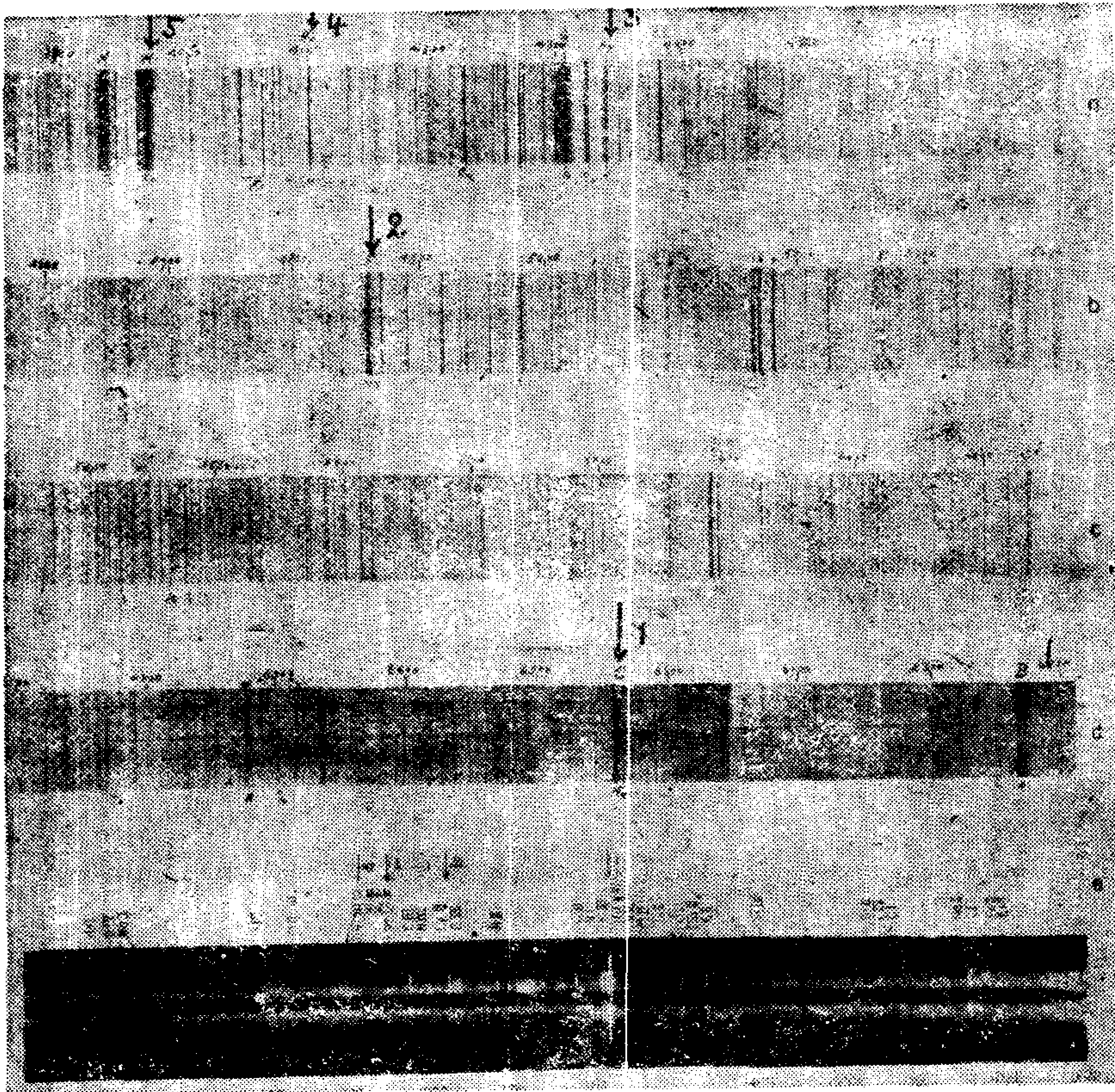
$$19、17、16、13\frac{1}{2}、7、2、1\frac{1}{2}$$

能不能根据某种合理的理论来解释呢？例如，它能否与数论联系起来，即与素数序列或者更复杂的数列有某种联系呢？要不然，它是否与拓扑学有联系，即与四维多面体的顶点、边、面和空间边界有着某种关系呢？我们不知道。但是让我们希望后辈物理学家的工作能够胜利解决这些问题吧！

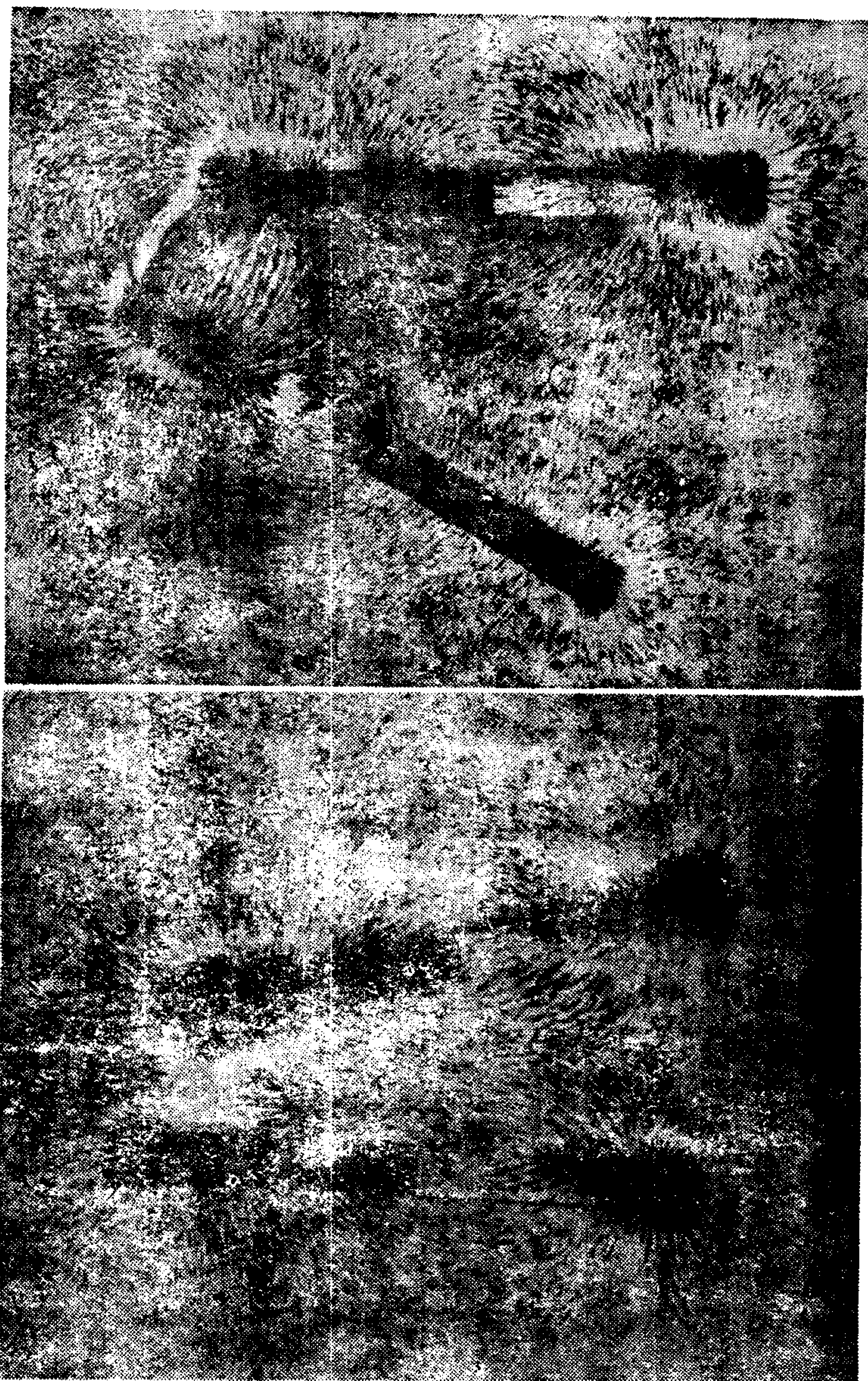




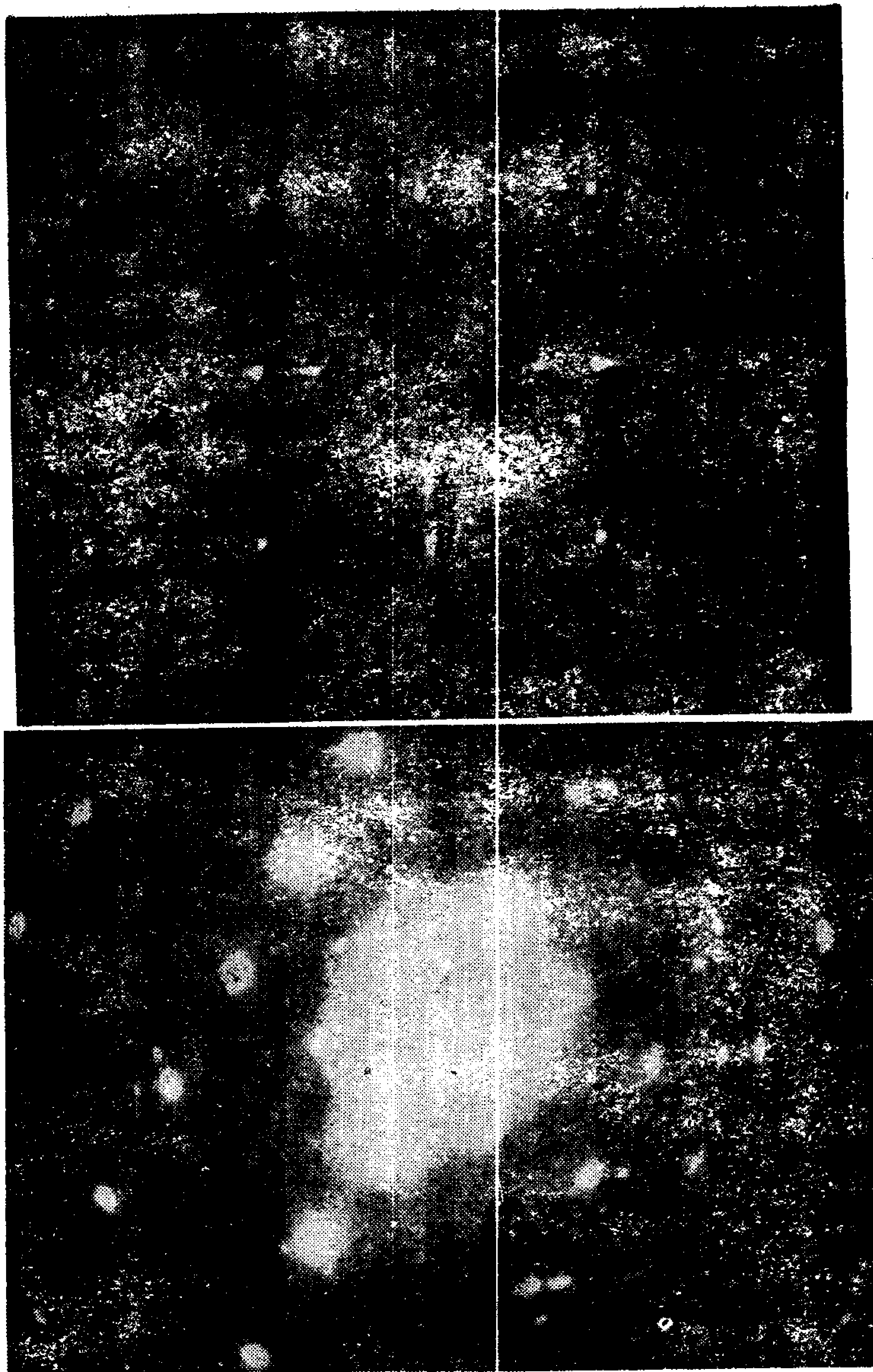
照片 I　(上)牛顿环　(下)冰洲石的双折射(科罗拉多大学)



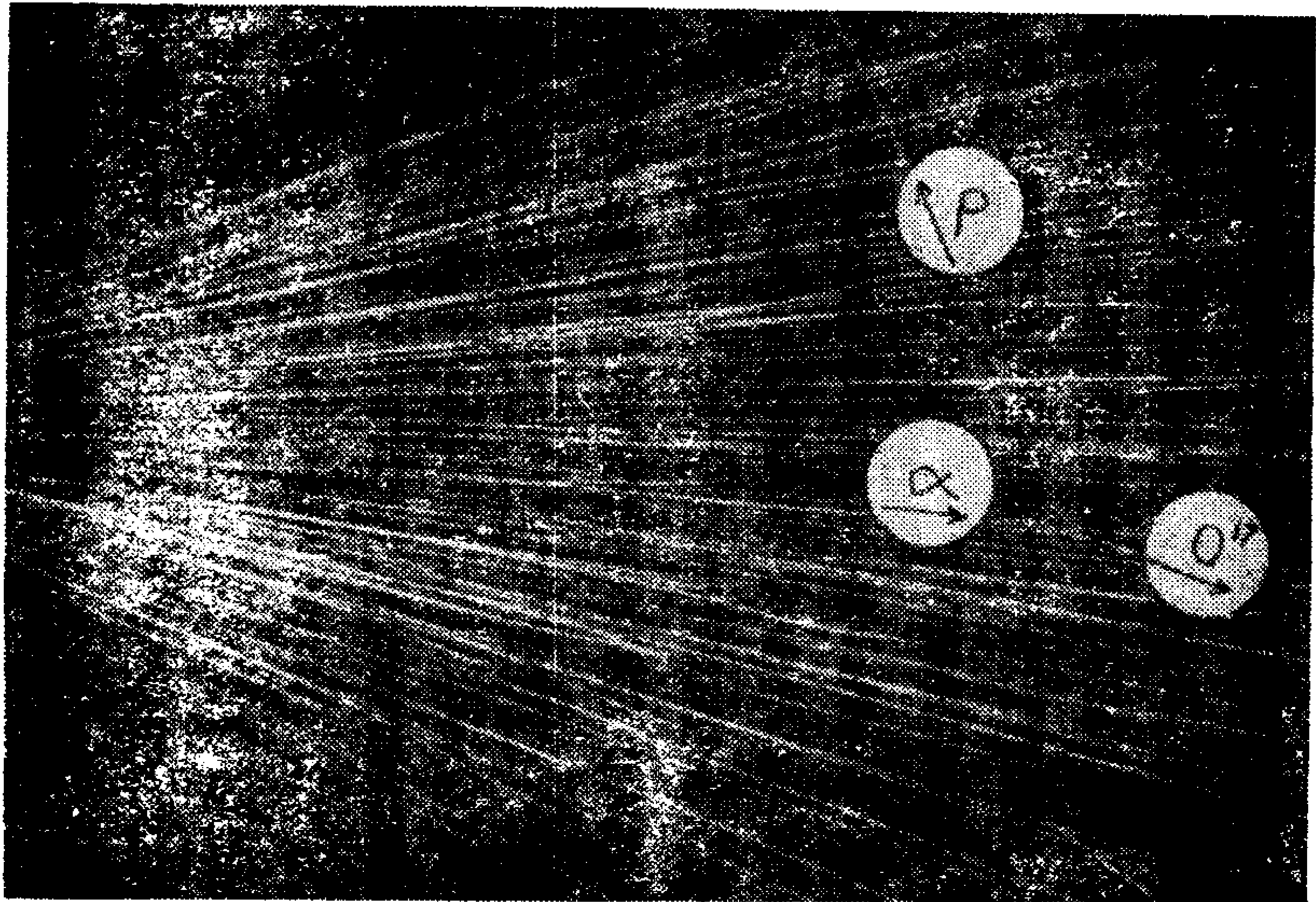
照片 II　a、b、c、d 用 13 英尺太阳望远照相机拍摄的太阳光谱的可见部分。编号的谱线对应于氢的巴尔末谱线。（威尔逊山天文台）e、用高速火箭拍摄的太阳远紫外光谱，编号的谱线对应于氢的喇曼谱线。（海军研究实验室）

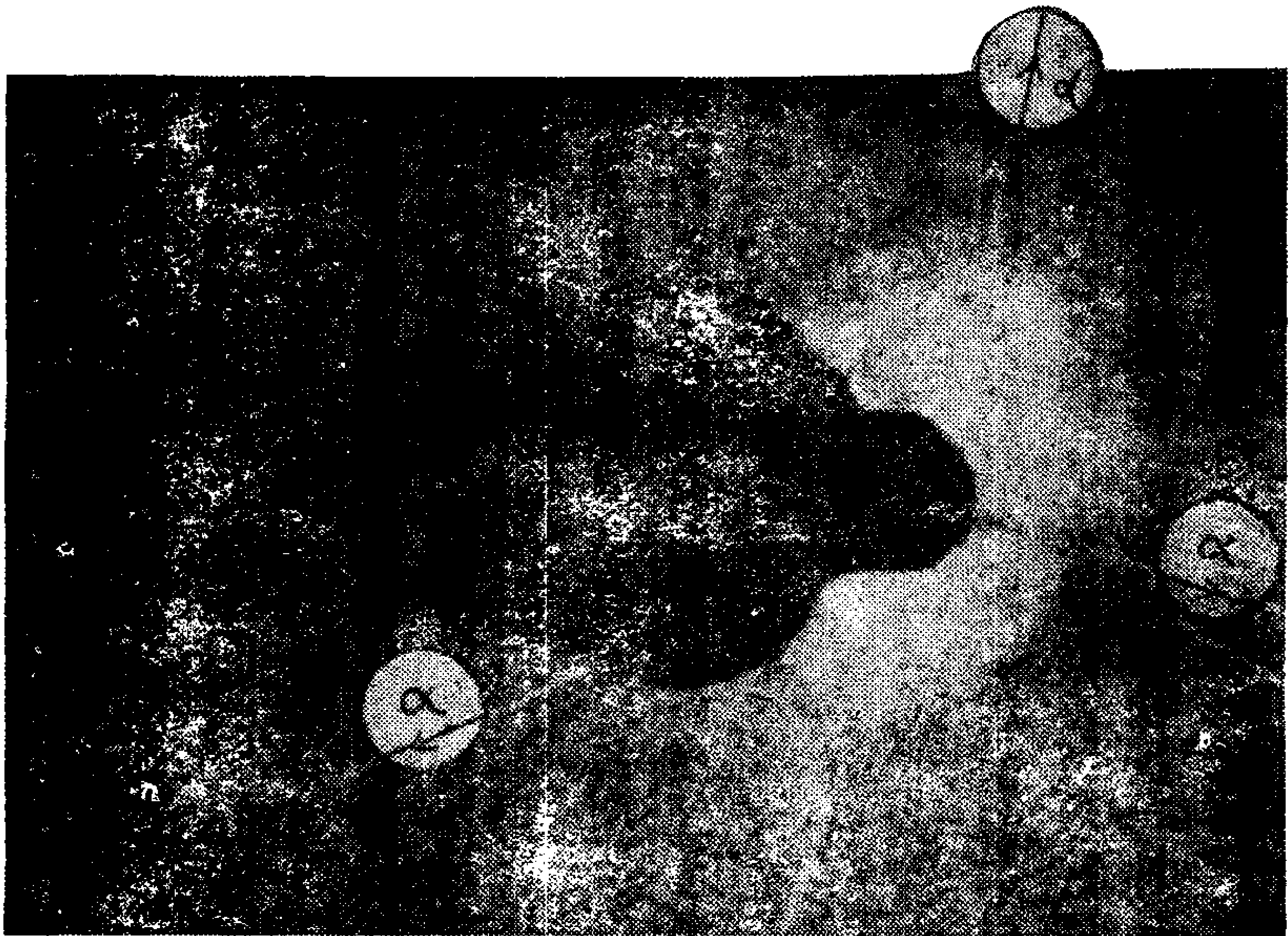


照片 III 取向相反的磁铁间的磁力线(上)和取向相同的两磁铁间的磁力线(下)。(科罗拉多大学)

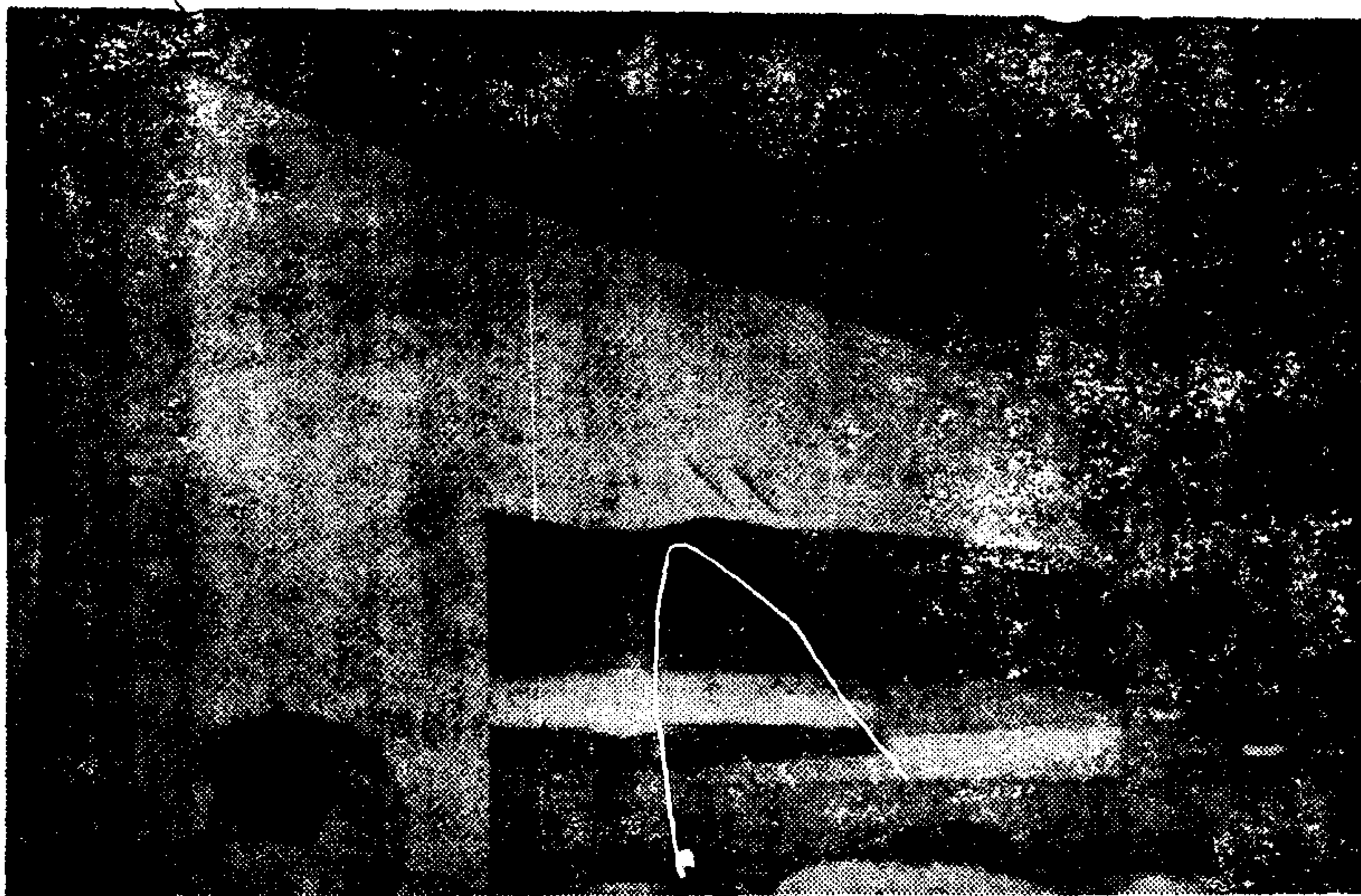


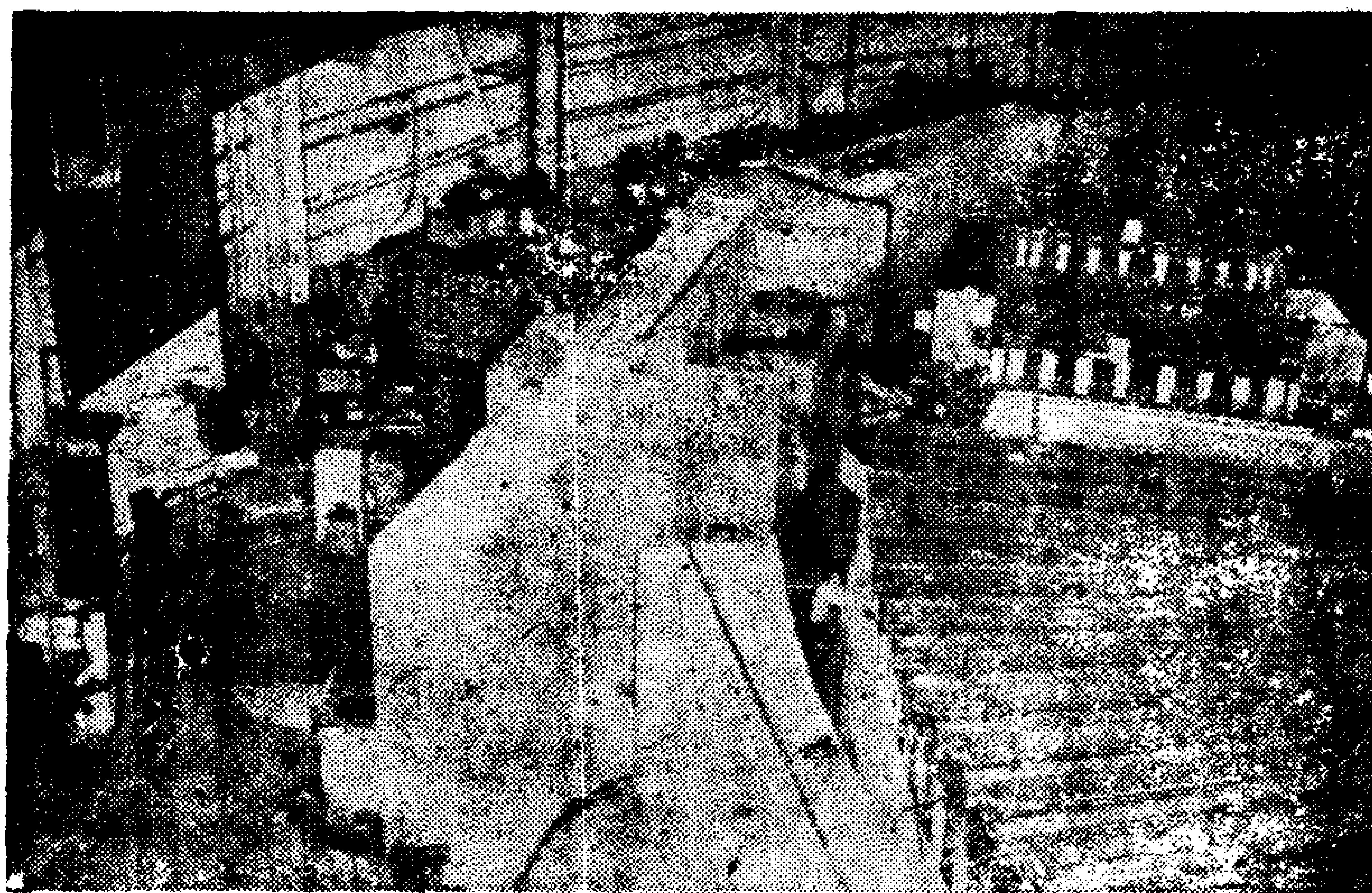
照片 IV （上）X射线在镍铁合金中的衍射，（下）100千伏的电子在同一合金中的衍射。（贝尔电话实验室）



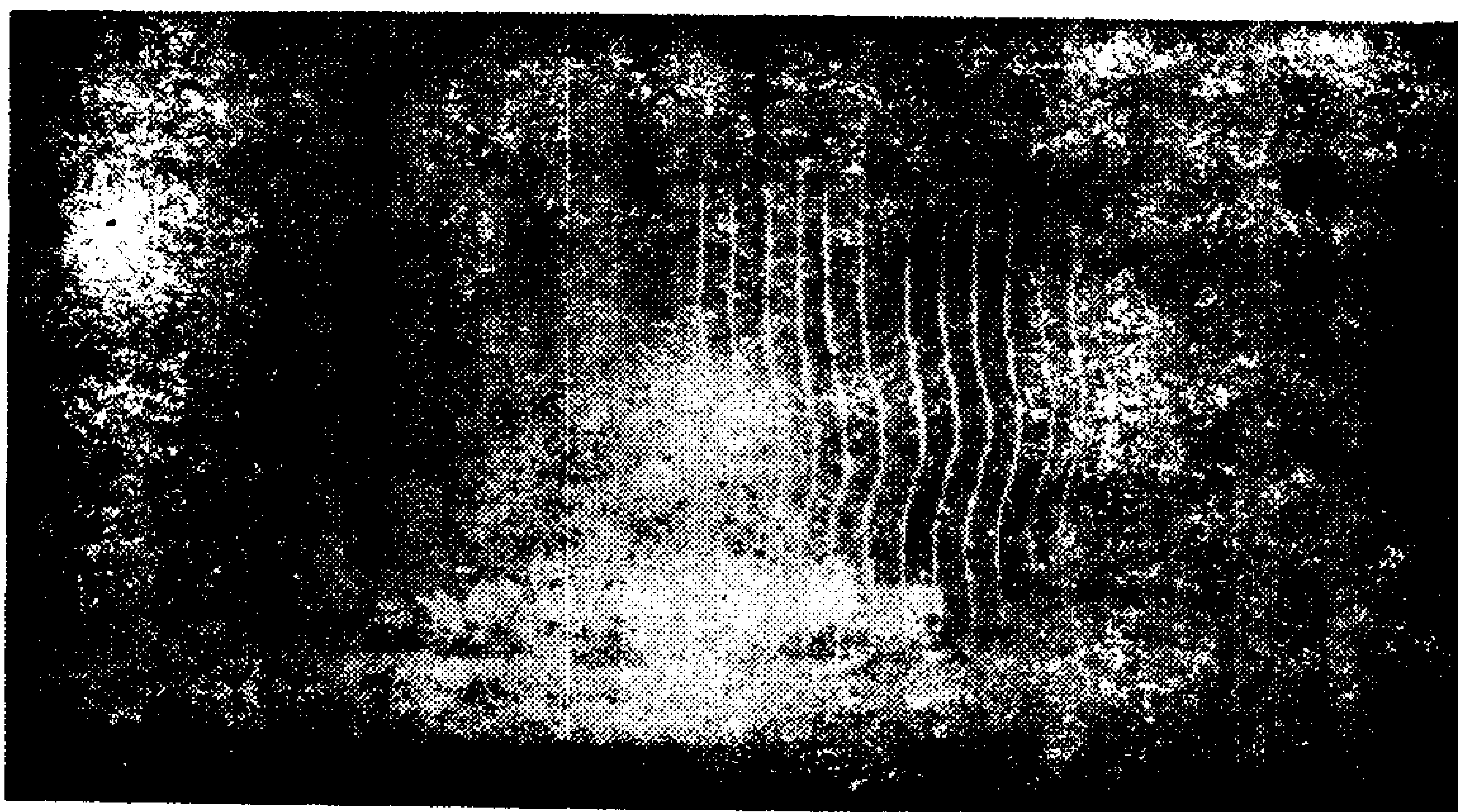


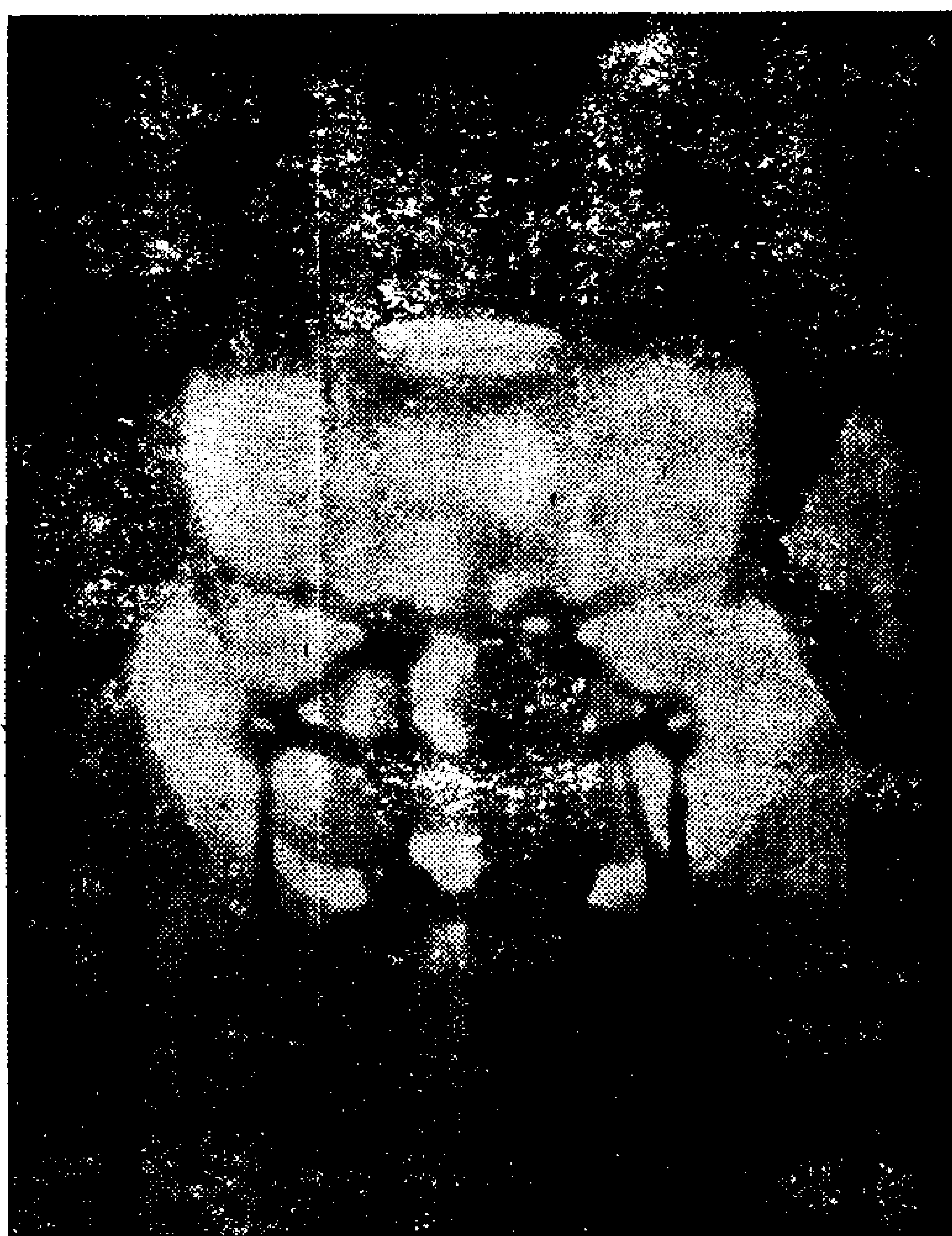
照片 V （上）人工核嬗变的第一张云室照片。（下）硼核裂变为三个 α 粒子。
（剑桥大学）



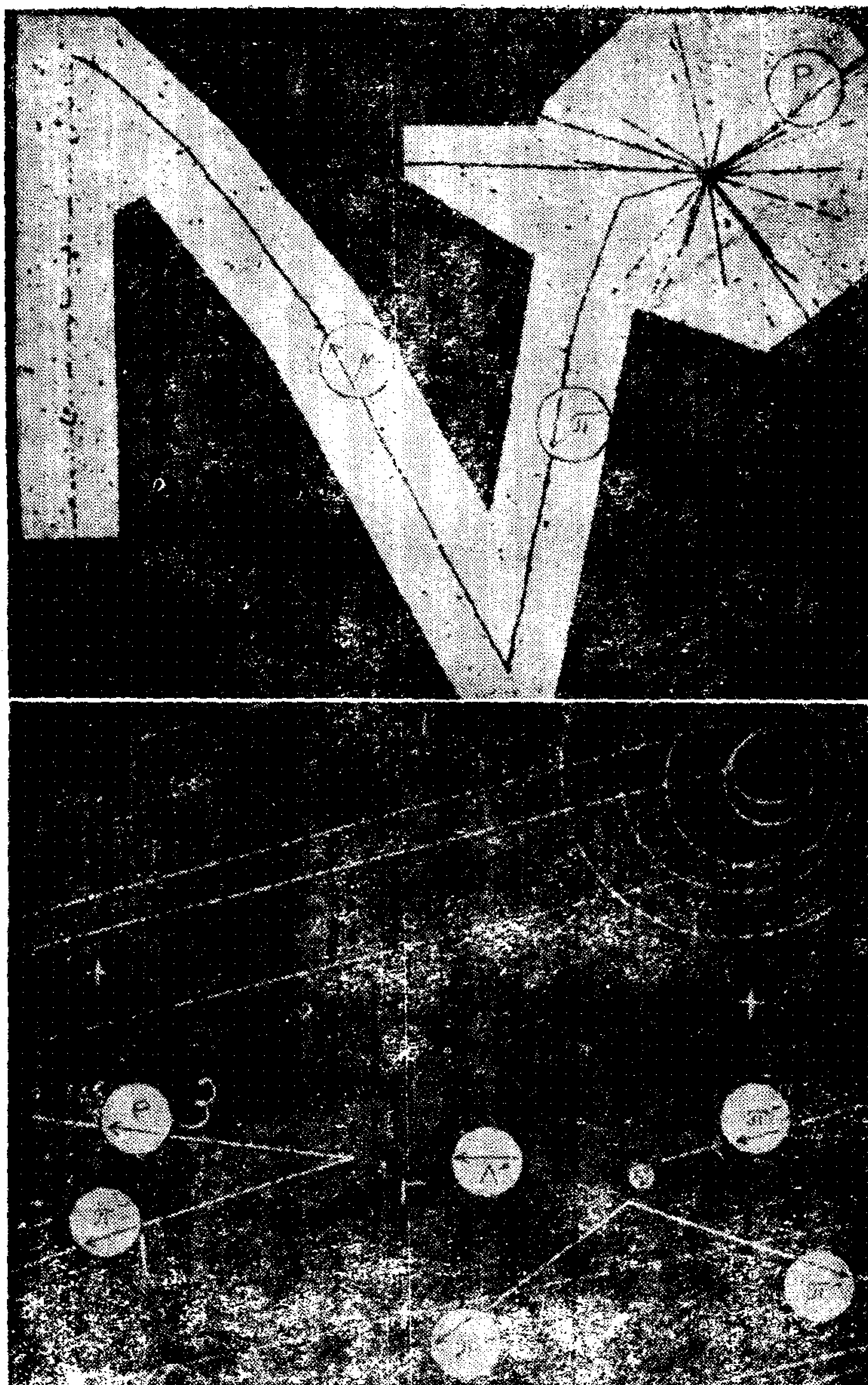


照片 VI （上）科罗拉多大学的回旋加速器，照片上照的是电磁极和横梁。
（下）加利福尼亚大学高能质子同步稳相加速器之一部。





照片 VII （上）在内华达进行的原子弹试验。（下）橡树岭游泳池式反应堆。（核能委员会）



照片 VIII （上）π 介子的产生及其随后衰变为 μ 介子和电子。厚感光乳胶片。（加拿大国家研究委员会）（下）气泡室中的一系列核事件。（加利福尼亚大学）

文　献

书中摘录的过去的伟大物理学家的原著主要引自:

«希腊科学史料» M. R. 科恩和 I. E. 德拉布钦著 麦克格劳-希尔，纽约，1948

«关于伟大世界体系的对话» 伽利略著 芝加哥大学出版，1953

«艾萨克·牛顿爵士的自然哲学的数学原理和他的世界体系» 加利福尼亚大学出版，1934

«光学；或论光的反射、折射、弯曲和颜色» 艾萨克·牛顿爵士著 G. 贝尔父子公司，伦敦，1931

«法拉第的日记» 英国皇家学会发布 G. 贝尔父子公司，伦敦，1932